

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

**ANALÝZA A OPTIMALIZACE
MODULÁRNÍHO MANIPULÁTORU PRO
MOBILNÍ ROBOT**

*Analysis and Optimization of Modular
Manipulator for Mobile Robot*

Student:

Bc. Lubomír Prokop

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Krys, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lubomír Prokop

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2301T013 Robotika

Téma:

Analýza a optimalizace modulárního manipulátoru pro mobilní robot
Analysis and Optimization of Modular Manipulator for Mobile Robot

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši stávajících manipulátorů používaných v mobilní robotice. Analyzujte stávající modulární manipulátor z jednotek SCHUNK na centru robotiky a dohledejte dostupné technické parametry jeho modulů.
2. Vytvořte simulační model modulárního manipulátoru pro potřeby kinematických a dynamických analýz. Vyšetřete potřebné krouticí momenty jednotlivých modulů v průběhu zvolených pracovních cyklů ve stávající konfiguraci manipulátoru.
3. Navrhněte varianty manipulátoru pro zvýšení jeho dosahu s minimálně šesti stupni volnosti.
4. Navržené varianty vzájemně porovnejte a vyberte tu, která nejlépe splňuje stanovené požadavky.
5. Vybranou variantu rozpracujte do úrovně detailního 3D modelu. Doložte podrobnou technickou dokumentaci včetně kontrolních výpočtů a analýz.
6. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému dle pokynů vedoucího.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

SKAŘUPA, J. MOSTÝN, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.

SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Krys, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lubomír Prokop

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dráhy 1027

Brušperk

739 44

Poděkování

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Příležitost pro mladé výzkumníky, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0016, podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především Ing. Václavu Krysovi Ph.D., prof. Dr. Ing. Vladimíru Mostýnovi a Ing. Tomáši Kotovi Ph.D. za poskytnuté konzultace při přípravě mé diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PROKOP, L. *Analýza a optimalizace modulárního manipulátoru pro mobilní robot: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2013, 58 s. Vedoucí práce: Krys, V.

Diplomová práce se zabývá analýzou a optimalizací modulárního manipulátoru pro použití v kombinaci s mobilním robotem. V teoretické části práce jsou popsány manipulátory mobilních robotů dle jejich využití. Dále je uveden přehled dostupných modulárních pohonných jednotek včetně jejich základních parametrů. V další části práce je analyzován aktuální stav modulárního manipulátoru sestaveného z pohonných jednotek od firmy Schunk. Následně je popsán experiment pro stanovení momentové konstanty daných pohonných jednotek. Na základě výsledků experimentu je vytvořen a optimalizován model manipulátoru v programu Creo 2. Z vytvořených variant řešení je vybrána optimální varianta.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PROKOP, L. *Analysis and Optimization of Modular Manipulator for Mobile Robot : Master Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2013, 58 p. Thesis head: Krys, V.

Thesis deals with the analysis and optimization of a modular manipulator that is intended to be used in combination with a mobile robot. In the theoretical part the manipulators of mobile robots are described according to their use. Further, the overview of available modular drive units is given including their basic specifications. In another part of the theses the current state of the modular manipulator consisted of the Schunk company drive units is analysed. The experiment for stating a moment constant of the mentioned drive units is than carried out. On the basis of the experiment results a model of the manipulator is created and optimized in the Creo 2 program. From all of the created variants the optimal one is selected.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	11
1 ÚVOD.....	14
2 MANIPULÁTORY MOBILNÍCH ROBOTŮ	15
2.1 PYROTECHNICKÉ ROBOTY	15
2.2 HASIČSKÉ ROBOTY	16
2.3 VÝZKUMNÉ ROBOTY	17
2.4 ROBOTICKÁ ZAŘÍZENÍ URČENÁ IMOBILNÍM OSOBÁM.....	19
3 MODULÁRNÍ POHONNÉ JEDNOTKY	20
3.1 POHONNÉ JEDNOTKY SCHUNK	20
3.2 POHONNÉ JEDNOTKY FESTO.....	22
3.3 POHONNÉ JEDNOTKY HARMONIC DRIVE	23
3.4 POROVNÁNÍ POHONNÝCH JEDNOTEK	24
4 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO STAVU MODULÁRNÍHO MANIPULÁTORU	25
4.1 VYUŽITÍ VÝKONU POHONNÝCH JEDNOTEK KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE	26
5 DYNAMICKÝ MODEL POHONNÉ JEDNOTKY PR – 090 – 51B	29
5.1 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ METODY STANOVENÍ MOMENTOVÉ KONSTANTY POHONNÉ JEDNOTKY PR – 090 – 51B	29
5.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ METODY STANOVENÍ MOMENTOVÉ KONSTANTY POHONNÉ JEDNOTKY PR – 090 – 51B	33
5.3 TVORBA SIMULAČNÍCH MODELŮ MODULÁRNÍCH JEDNOTEK	40
6 VARIANTY ŘEŠENÍ.....	44
6.1 POŽADAVKOVÝ LIST	44
6.2 VARIANTA A.....	45
6.3 VARIANTA B	46
6.4 VARIANTA C	47
7 VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	48
8 POPIS OPTIMÁLNÍ VARIANTY.....	53
9 ZÁVĚR	56

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
11 PŘÍLOHY.....	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Význam	Jednotka
F	Síla způsobená závažím.	[N]
F_G	Síla způsobená hmotností mobilního robotu.	[N]
F_{HM}	Síla způsobená hmotností manipulátoru.	[N]
I_{xx}	Moment setrvačnosti pohonné jednotky kolem osy x souřadného systému.	[kg · m ²]
I_{yy}	Moment setrvačnosti pohonné jednotky kolem osy y souřadného systému.	[kg · m ²]
I_{zz}	Moment setrvačnosti pohonné jednotky kolem osy z souřadného systému.	[kg · m ²]
I_i	Proud odebíraný pohonnou jednotkou při i-tém měření.	[A]
I_{S-i}	Střední hodnota proudu odebíraného pohonnou jednotkou při i-tém měření.	
I_{S-i-j}	Střední hodnota proudu odebíraného pohonnou jednotkou při i-tém měření a natočení pohonné jednotky o úhel φ_j .	[A]
$I_{S-i-MIN}$	Minimum střední hodnoty proudu odebíraného pohonnou jednotkou při i-tém měření.	[A]
$I_{S-i-MAX}$	Maximum střední hodnoty proudu odebíraného pohonnou jednotkou při i-tém měření.	[A]
L	Maximální dosah optimální varianty manipulátoru.	[mm]
L_1	Vzdálenost od působíště síly F_{HM} k okraji dotykové plochy robotu.	[mm]
L_2	Vzdálenost od působíště síly F_G k působíšti síly F_{HM} .	[mm]
M_{KT-TRU}	Krouticí moment způsobený experimentální zařízením bez závaží	[N · m]
M_{KD}	Klopný moment – dynamický.	[N · m]
$M_{KT-MAX-i}$	Maximální hodnota teoretického krouticího momentu při i-tém měření.	[N · m]
M_{KTR}	Hodnota přírůstku pro nastavení maximálního krouticího momentu.	[N · m]
M_{KT-i}	Teoretický krouticí moment pohonné jednotky při i-tém.	[N · m]
M_{K-MAX}	Maximální hodnota krouticího momentu pohonné jednotky	[N · m]

deklarovaná výrobcem.

M_{KT-i-j}	Teoretický krouticí moment při i-tém měření a natočení pohonné jednotky o úhel φ_j .	$[N \cdot m]$
M_{KT}	Krouticí moment způsobený třením.	$[N \cdot m]$
M_{KZ-g}	Aktuální hodnota ztrátového krouticího momentu.	$[N \cdot m]$
M_{KZ-l}	Konečná hodnota ztrátového krouticího momentu.	$[N \cdot m]$
M_{KZ}	Výsledný ztrátový krouticí moment.	$[N \cdot m]$
M_{KS-i-j}	Skutečný krouticí moment při i-tém měření a natočení pohonné jednotky o úhel φ_j .	$[N \cdot m]$
$M_{KS-i-MIN}$	Minimální hodnota skutečného krouticího momentu při i-tém měření.	$[N \cdot m]$
$M_{K-MAX-PJ}$	Maximální krouticí moment pohonné jednotky.	$[N \cdot m]$
M_{KS-MAX}	Maximální skutečný krouticí moment.	$[N \cdot m]$
a	Koeficient rovnice závislosti váhy významnosti na počtu voleb.	$[-]$
a_k	Maximální zrychlení koncového bodu optimální varianty manipulátoru.	$[mm/s^2]$
b	Koeficient rovnice závislosti váhy významnosti na počtu voleb.	$[-]$
g	Gravitační zrychlení.	$[m/s^2]$
k	Momentová konstanta pohonné jednotky.	$[N \cdot m/A]$
k_j	Dílčí momentová konstanta pohonné jednotky a natočení pohonné jednotky o úhel φ_j .	$[N \cdot m/A]$
$l_{ij} *$	Vážený index kritérií.	$[-]$
m	Počet měřených hodnot odebíraného proudu v průběhu jednoho měření.	$[N \cdot m/A]$
q	Váha významnosti.	$[-]$
r	Poloměr nastavení závaží.	$[mm]$
v_k	Maximální rychlost koncového bodu optimální varianty manipulátoru.	$[mm/s]$
v	Počet voleb.	$[-]$
α	Úhel volený pro dosažení požadované úhlové rychlosti pohonné jednotky.	$[^\circ]$
α_1	Upravený úhel pro dosažení požadované úhlové rychlosti pohonné jednotky.	$[^\circ]$
β	Hlavní část měřeného úseku.	$[^\circ]$

β_1	Upravená hlavní část měřeného úseku.	[°]
γ	Úhel volený pro zabrzdění pohonné jednotky.	[°]
γ_1	Upravený úhel pro zabrzdění pohonné jednotky.	[°]
δ	Celkový úhel rotace pohonné jednotky během měření.	[°]
δ_1	Upravený celkový úhel rotace pohonné jednotky během měření.	[°]
ε	Úhlové zrychlení pohonné jednotky během měření.	[°/s ²]
φ	Úhel natočení pohonné jednotky.	[°]
ω	Úhlová rychlost pohonné jednotky během měření.	[°/s]

1 ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na analýzu a optimalizaci modulárního manipulátoru sestaveného z pohonných jednotek firmy „Schunk“. Hlavním cílem diplomové práce je zvýšení dosahu zmíněného manipulátoru při zvolených hodnotách rychlosti, zrychlení koncového bodu a nosnosti.

Analýza modulárního manipulátoru spočívá ve vyšetření a popisu aktuálního stavu. První část analýzy se zabývá doplněním klíčových teoretických hodnot parametrů jednotlivých pohonných jednotek. Ve druhé části analýzy jsou hodnoty těchto parametrů získány experimentálně a následně porovnány s teoretickými hodnotami. Výsledkem analýzy jsou reálné hodnoty sledovaných parametrů jednotlivých pohonných jednotek, které jsou použity jako okrajové podmínky pro následnou optimalizaci.

Optimalizací manipulátoru jsou prodlouženy spojovací příruby pohonných jednotek, čímž je zvýšen celkový dosah. Spojovací příruby je možné optimalizovat také pevnostně, což by vedlo nejen ke snížení hmotnosti, nýbrž také k dalšímu zvýšení dosahu.



Obr. 1 iRobot „710 Warrior“. [1]

2 MANIPULÁTORY MOBILNÍCH ROBOTŮ

V současné době se žádná z firem specializujících se na robotiku nezabývá sériovou výrobou manipulačních ramen přímo určených pro aplikaci na mobilní podvozek. Firmy zabývající se servisní robotikou zpravidla konstruuje celý mobilní robot včetně manipulačního ramene jako funkční celek. Naproti tomu koncepce manipulačních ramen umožňujících samostatné nasazení na téměř libovolném mobilním podvozku je často přejímána z univerzálních průmyslových manipulačních ramen. Toto přináší celou řadu nevýhod, jako je vyšší výrobní cena nebo složitost oprav. Největší nevýhodou přejímání této koncepce je fakt, že takto navržené manipulační rameno není možné dále modifikovat.

Naproti tomu modulární manipulační ramena nebývají postižena výše jmenovanými nevýhodami zejména proto, že každá pohonná jednotka tvoří samostatný funkční celek. Takovéto pohonné jednotky je tedy možné použít pro sestavení libovolných kinematických struktur s možností volby nosnosti, dosahu a rychlosti pohybu manipulátoru.

Pohon manipulačních ramen mobilních robotů je nejčastěji zajišťován DC elektromotory napájenými z baterií. V případě vyšší požadované nosnosti jsou užívány přímočaré či rotační hydromotory. Konstrukce mobilních robotů s hydromotory je však spíše výjimečná. Pro pohon hydrogenerátorů bývá použit spalovací motor.

2.1 Pyrotechnické roboty

Manipulátor pyrotechnických robotů slouží k přemísťování výbušných zařízení. Tyto manipulátory bývají osazovány celou řadou efektorů. Jedná se o efektor manipulační, manipulačně technologické a technologické. Příkladem technologických efektorů pyrotechnický robotů mohou být tlakové rozstřelovače nebo vrtačky. Pro usnadnění práce obsluhy může být manipulátor osazen kamerou. Hlavní požadavky na manipulátor pyrotechnických robotů jsou:

Dosah manipulátoru - zvětšuje akční rádius pyrotechnického robotu v terénu, ve kterém se robot již dále nedokáže pohybovat. Zároveň umožňuje pohyb koncového efektoru kolem výbušného zařízení. Běžné hodnoty dosahu se pohybují v rozsahu od 50 cm u malých robotů, do 200 cm u větších robotů.

Počet stupňů volnosti manipulátoru - umožňuje zásah robotu i ve stísněných a těžce přístupných prostorech. Nejčastěji od 4 do 8 stupňů volnosti.

Přesnost polohování a bezvúlové provedení manipulátoru - tyto parametry zajišťují plynulou a přesnou manipulaci s efektozem, která je nutná například při vyjímání rozbušky, případně při stříhání vodičů výbušného zařízení.

Nosnost manipulátoru - nosnost se běžně pohybuje v rozsahu od 1 kg do 100 kg.



Obr. 2 iRobot „710 Warrior”. [2]

2.2 Hasičské roboty

Manipulátor hasičských robotů je užíván především k manipulaci s předměty jako například tlakové láhve, které mohou v důsledku přehřátí explodovat. Další neméně významnou funkcí manipulátoru hasičského robotu je schopnost zaměřit proud hasící tekutiny směrem k místu požáru. Výhodou umístění hasící trysky v manipulátoru je možnost ochlazování uchopených předmětů. Tímto se výrazně snižuje riziko exploze. Mezi nejdůležitější požadavky na manipulátor hasičských robotů náleží:

Dosah manipulátoru - hasící roboty mívají často velice masivní konstrukci, tak aby mohly lépe odolávat vysokým teplotám. Zaroveň je nutné přizpůsobit dosah manipulátoru tak, aby dokázal zvedat předměty ležící na zemi.

Přesnost polohování a polohová tuhost manipulátoru - zajišťuje ovladatelnost a přesné směřování hasící tekutiny.

Nosnost manipulátoru – bývá přibližně do 400 kg, takto je robot schopen manipulovat i s nejtěžšími tlakovými láhvemi.

Tepelná odolnost manipulátoru – při konstruování manipulátoru je nutné brát ohled na vysoké teploty prostředí, ve kterém je robot nasazován.



Obr. 3 „Hardy”. [3]

2.3 Výzkumné roboty

Manipulátory těchto robotů jsou spíše lehčí konstrukce a není u nich vyžadována vysoká nosnost či rychlost pohybu. Slouží především k manipulaci s různými senzory, případně také k odběru vzorků. Hlavní požadavky na manipulátory těchto robotů vyplývají zejména z prostředí:

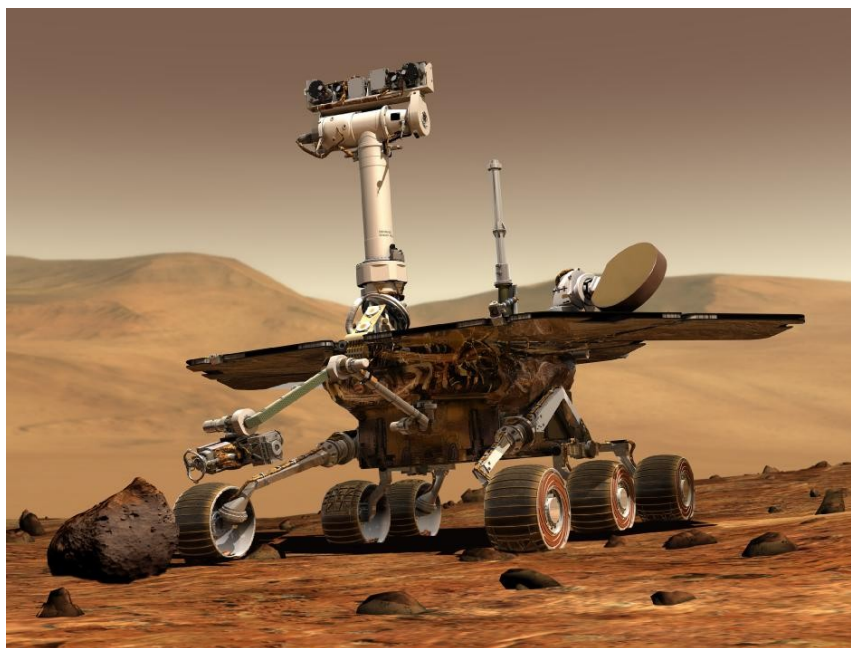
Průzkum těles sluneční soustavy:

Měsíc planety Země – manipulátor je uzpůsoben pro práci ve velice prašném prostředí. Dále je při konstrukci těchto manipulátorů nutné brát v úvahu, že ve vzduchoprázdnu nedojde k vytvoření slabé vrstvy oxidu železitého Fe_2O_3 , díky kterému je umožněn pohyb dvou vzájemně se dotýkajících součástí. Tento problém je řešen vzduchotěsným uzavřením všech takto postihovaných součástí, případně použitím speciálního maziva na bázi polymerů. Zároveň musí být schopen pracovat při teplotách $150\text{ }^\circ\text{C}$ během měsíčního dne a přečkat teploty $-240\text{ }^\circ\text{C}$ během měsíční noci.

Venuše – manipulátory pro průzkum Venuše musí odolávat tlaku přibližně $9,3\text{ MPa}$, teplotě $460\text{ }^\circ\text{C}$ a také vysoce koncentrované kyselině sírové, která je rozptýlena zejména ve vyšších polohách [4].

Průzkum povrchu planety Země:

Oceány, moře, jezera – manipulátory těchto robotů jsou konstruovány s ohledem na vyšší tlak prostředí, který je úměrný hloubce ponoru. S tímto je také spojen problém s těsností pohyblivých spojů manipulátorů.



Obr. 4 MER-A „Spirit”. [5]

2.4 Robotická zařízení určená imobilním osobám

Tato zařízení jsou momentálně ve fázi vývoje, ale již nyní existují funkční prototypy. Nejběžnějšího zástupce těchto zařízení představuje invalidní vozík, který je vybaven manipulátorem. Tato zařízení slouží ke zvýšení pohyblivosti imobilní osoby. Díky tomu se značně zvyšuje samostatnost těchto osob. Hlavními požadavky na tyto manipulátory jsou dostatečný dosah, dostatečná nosnost, přesnost polohování a počet stupňů volnosti.



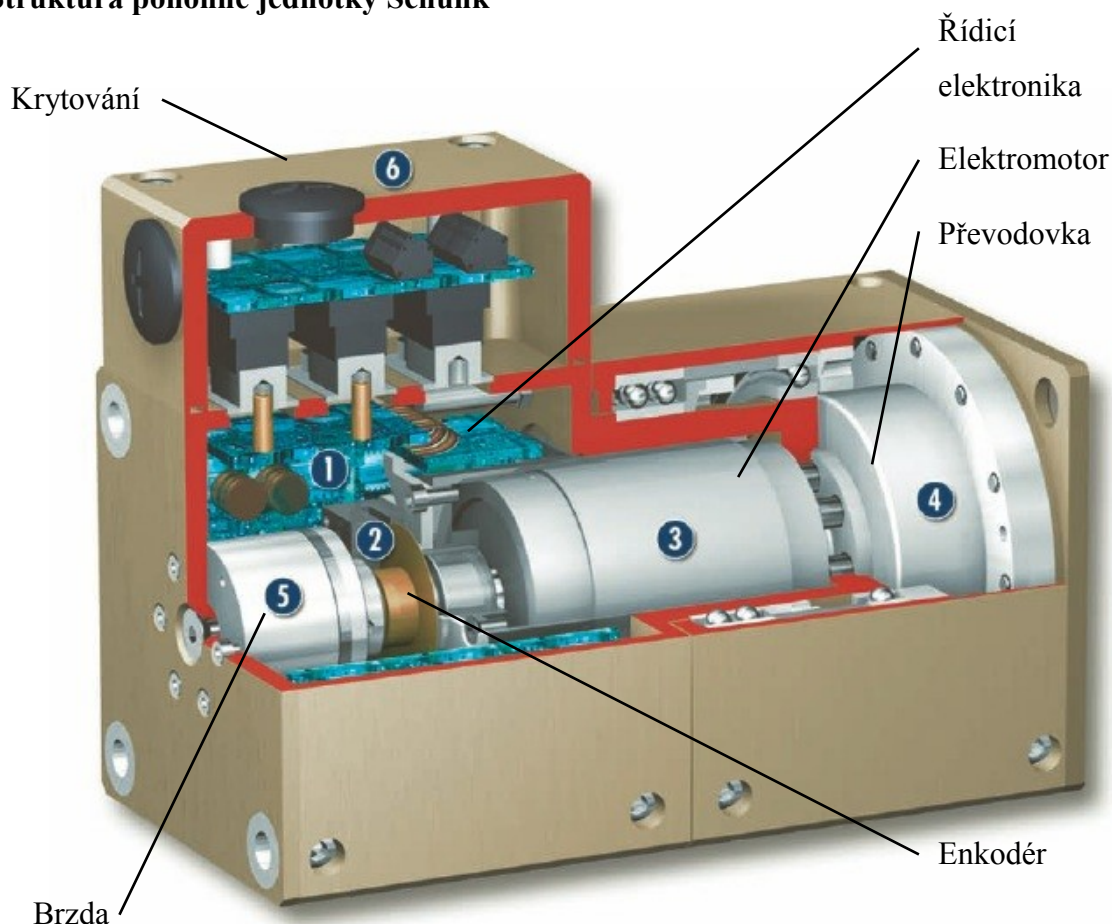
Obr. 5 Schunk „Amarob”. [6]

3 MODULÁRNÍ POHONNÉ JEDNOTKY

Modulární pohonné jednotky jsou základními stavebními prvky modulárních manipulátorů. Modulární pohonná jednotka představuje ucelený konstrukční uzel, který vykonává pohyb s určitými parametry. Pro vytvoření řetězce manipulátoru se tyto jednotky spojují spojovacími prvky různých rozměrů a tvarů. Zároveň jsou propojeny signální a výkonovou kabeláží. Hlavní výhodou těchto jednotek je možnost v relativně krátkém čase navrhnout a sestavit manipulátor o požadovaných výkonových a rozměrových vlastnostech. Vývojem a výrobou těchto jednotek se zabývají zejména firmy Schunk, Festo a Harmonic Drive.

3.1 Pohonné jednotky Schunk

Struktura pohonné jednotky Schunk



Obr. 6 Schunk „PR-070”. [7]

Provedení pohonných jednotek Schunk

Stejně jako u průmyslových robotů je nejčastější kinematickou strukturou modulárních manipulátorů struktura sférická, angulární. Tomu také odpovídá sortiment firmy Schunk, který je orientován téměř výhradně na rotační pohonné jednotky. Tyto modulární jednotky mívají nejčastěji jednu osu rotace a používají se zejména ke konstrukci polohovacího ústrojí. Dále jsou nabízeny modulární pohonné jednotky se dvěma navzájem kolmými rotačními osami. Tyto jednotky se užívají především ke konstrukci orientačního ústrojí. Jejich výhodou je realizace pohybu ve dvou stupních volnosti při zachování přijatelných rozměrů. Nevýhodou může být menší krouticí moment pro osu rotace s neomezeným rozsahem pohybu.

Parametry pohonných jednotek Schunk s jedním stupněm volnosti

PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA
Krouticí moment	15 až 372	[N·m]
Úhel rotace	neomezeno	[°]
Pracovní teplota	5 až 55	[°C]
Opakovatelná přesnost	0,02 až 0,04	[°]
Úhlová rychlost	70 ž 470	[°/s]
Úhlové zrychlení	200 až 1880	[°/s ²]
Napájecí napětí	24	[V]

Tab. 1 Parametry pohonných jednotek Schunk – jeden stupeň volnosti. [7], [8], [9]

Parametry pohonných jednotek Schunk se dvěma stupni volnosti

PARAMETR	OSA ROTACE 1	OSA ROTACE 2	JEDNOTKA
Krouticí moment	24 až 46	4 až 24	[N·m]
Úhel rotace	240	neomezeno	[°]
Pracovní teplota	5 až 55	5 až 55	[°C]
Opakovatelná přesnost	0,04	0,04	[°]
Úhlová rychlost	150 ž 240	240 až 360	[°/s]
Úhlové zrychlení	600 až 960	960 až 1440	[°/s ²]
Napájecí napětí	24	24	[V]

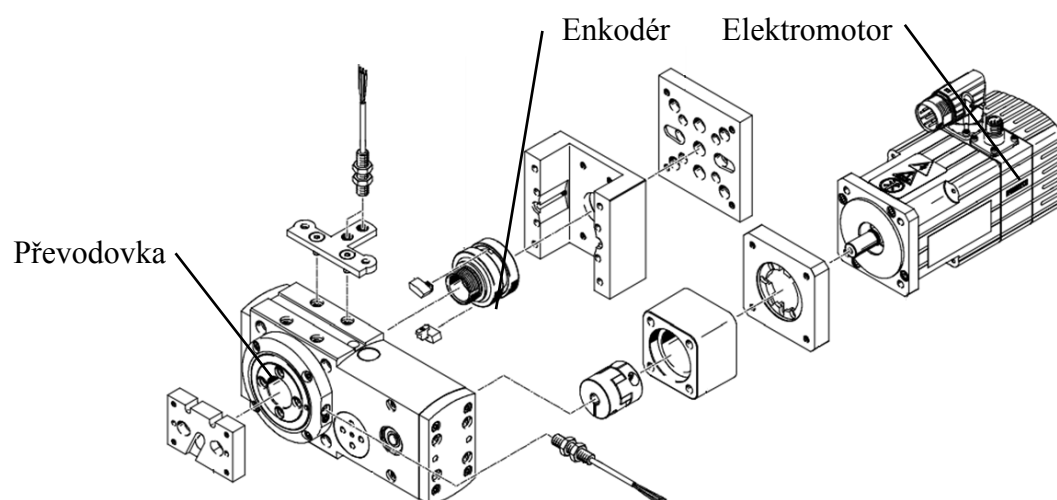
Tab. 2 Parametry pohonných jednotek Schunk – dva stupně volnosti. [10]



Obr. 7 Schunk „PW-070”. [10]

3.2 Pohonné jednotky Festo

Struktura pohonné jednotky Festo



Obr. 8 Pohonná jednotka Festo „ERMB”. [11]

Provedení pohonných jednotek Festo

Výrobní sortiment firmy Festo je zaměřen zejména na translační pohonné jednotky. Rotační jednotky této firmy se vyznačují vysokými úhlovými rychlostmi a nejširším

rozsahem pracovních teplot. Tyto pohonné jednotky mívají ovšem silně nekompaktní konstrukci.

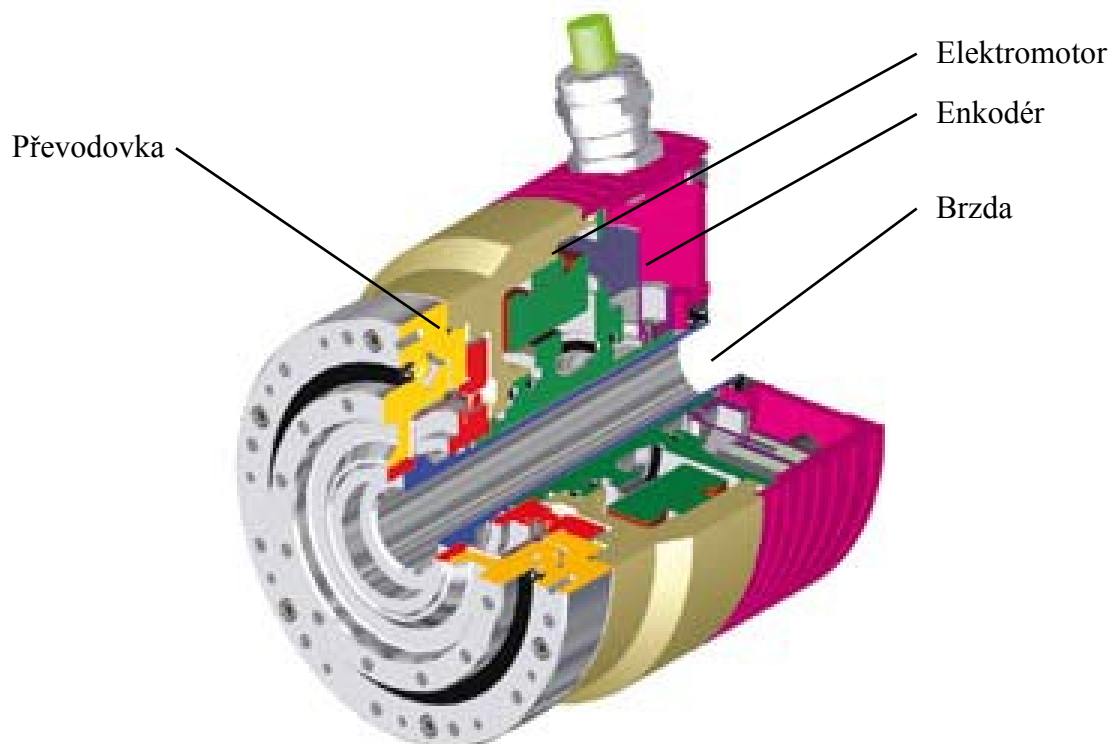
Parametry pohonných jednotek Festo

PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA
Krouticí moment	3,15 až 25,5	[N·m]
Úhel rotace	neomezeno	[°]
Pracovní teplota	-10 až 60	[°C]
Opakovatelná přesnost	0,06 až 0,16	[°]
Úhlová rychlost	5400 až 8100	[°/s]
Úhlové zrychlení	400 až 600	[°/s ²]
Napájecí napětí	24 / 48	[V]

Tab. 3 Parametry pohonných jednotek Festo. [11]

3.3 Pohonné jednotky Harmonic Drive

Struktura pohonné jednotky Harmonic Drive



Obr. 9 Pohonná jednotka Harmonic Drive „CHA Hollow Shaft Actuator”.

Provedení pohonných jednotek Harmonic Drive

Firma Harmonic Drive se zaměřuje výhradně na vývoj rotačních pohonných jednotek, které se vyznačují vysokou opakovatelnou přesností.

Parametry pohonných jednotek Harmonic Drive

PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA
Krouticí moment	56 až 372	[N·m]
Úhel rotace	neomezeno	[°]
Pracovní teplota	-30 až 50	[°C]
Opakovatelná přesnost	až 0,0016	[°]
Úhlová rychlost	180 ž 780	[°/s]
Úhlové zrychlení	neuváděno	[°/s ²]
Napájecí napětí	24 / 48	[V]

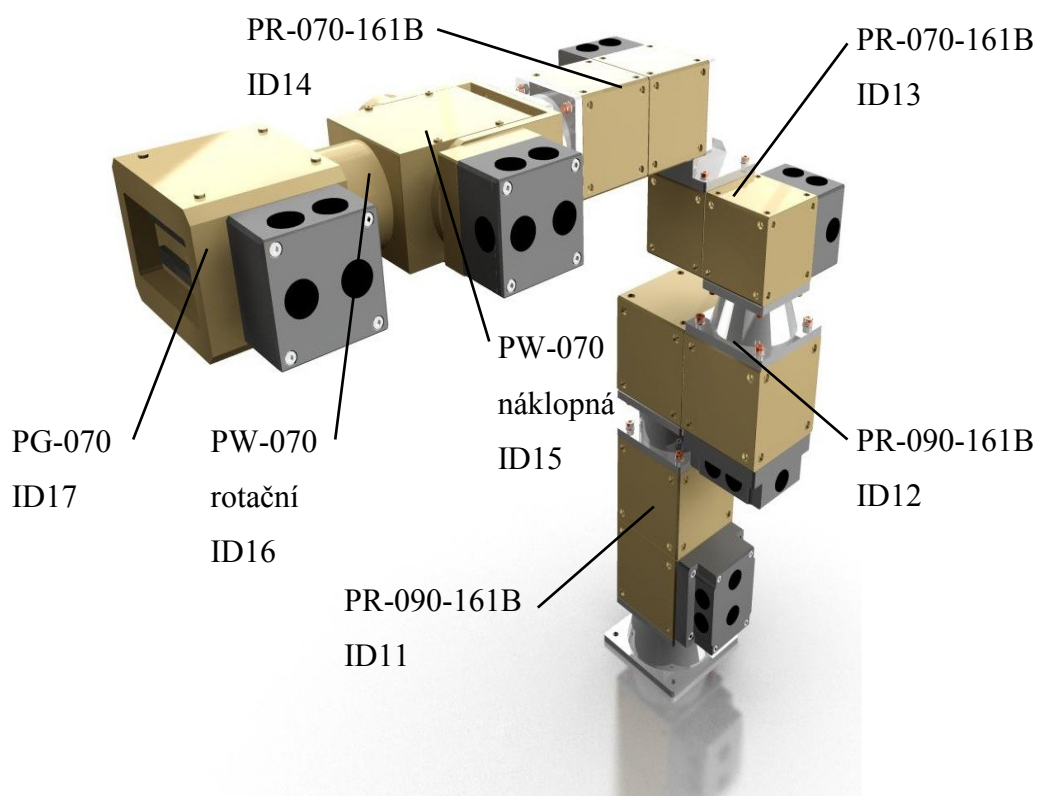
Tab. 4 Parametry pohonných jednotek Harmonic Drive. Příloha „Aplikace v obranné a vojenské technice“

3.4 Porovnání pohonných jednotek

Z uvedeného přehledu vyplývá, že pohonné jednotky Festo jsou díky vysoké úhlové rychlosti předurčeny k vykonávání vysoce dynamických úloh. Nevýhodou zejména v servisní robotice může být nekompaktnost těchto jednotek, což zvyšuje pravděpodobnost, že se operátorem řízený robot zachytí o překážku. Toto by mohlo vést k nutnosti vyproštění robotu obsluhou. Z porovnání dále vyplývá, že pohonné jednotky Schunk a Harmonic Drive dosahují, co se výkonových parametrů týče, obdobné úrovně. Zároveň se vyznačují velice kompaktní konstrukcí. Nicméně pohonné jednotky Schunk jsou určeny pro práci v uzavřených prostorech. Nejvhodnějšími pohonnými jednotkami pro konstrukci manipulátoru mobilního robotu tedy jsou jednotky od firmy Harmonic Drive, které jsou konstruovány pro venkovní použití.

4 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO STAVU MODULÁRNÍHO MANIPULÁTORU

Analýza stávajícího stavu napomáhá k vytvoření návrhů možných variant řešení. Manipulátor je spojen spojovacími přírubami od firmy Schunk. Jedná se o angulární kinematickou strukturu se šesti stupni volnosti. Nosnost manipulátorů je 3 kg.



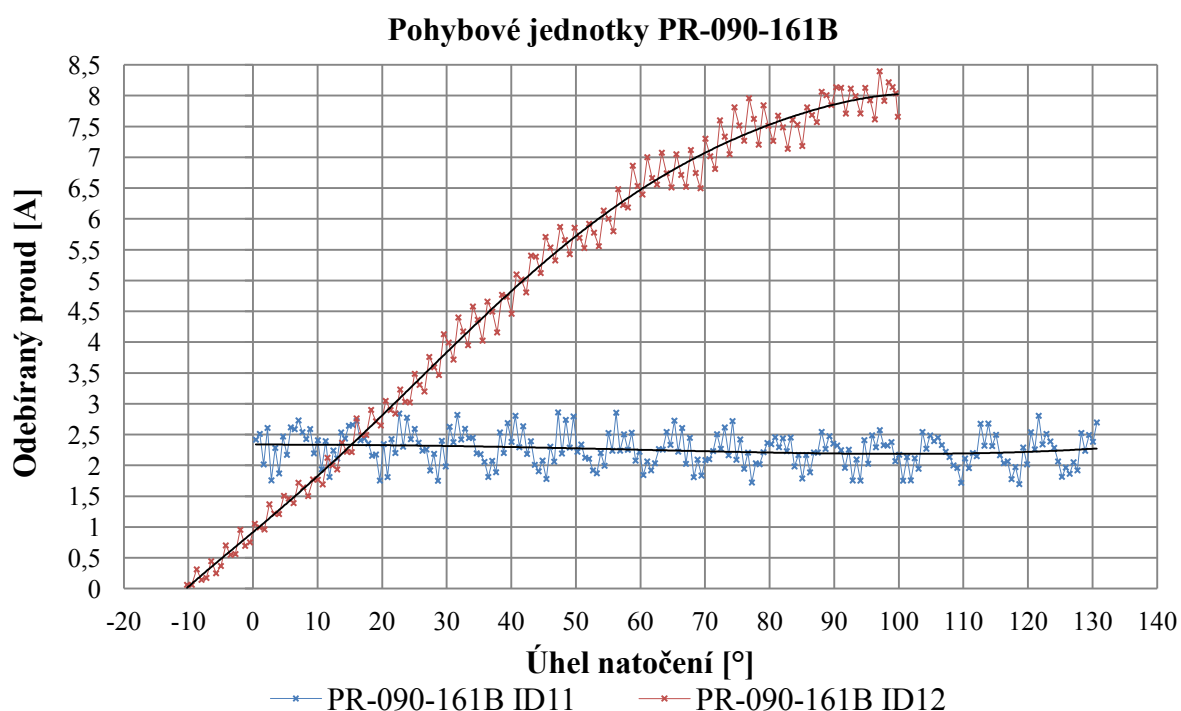
Obr. 10 Varianta A.

Pohonná jednotka	Maximální krouticí moment při simulaci [N·m]	Jmenovitý krouticí moment pohonné jednotky [N·m]	Procentuální vyjádření [%]
PR-090-161B – ID11	1,3	72	1,8
PR-090-161B – ID12	30	72	41,7
PR-070-161B – ID13	20	23	87
PR-070-161B – ID14	2	23	8,7
PW-070 – ID15	4,5	12	37,5
PW-070 – ID16	0,2	2	10
Celkové využití manipulátoru			31,1

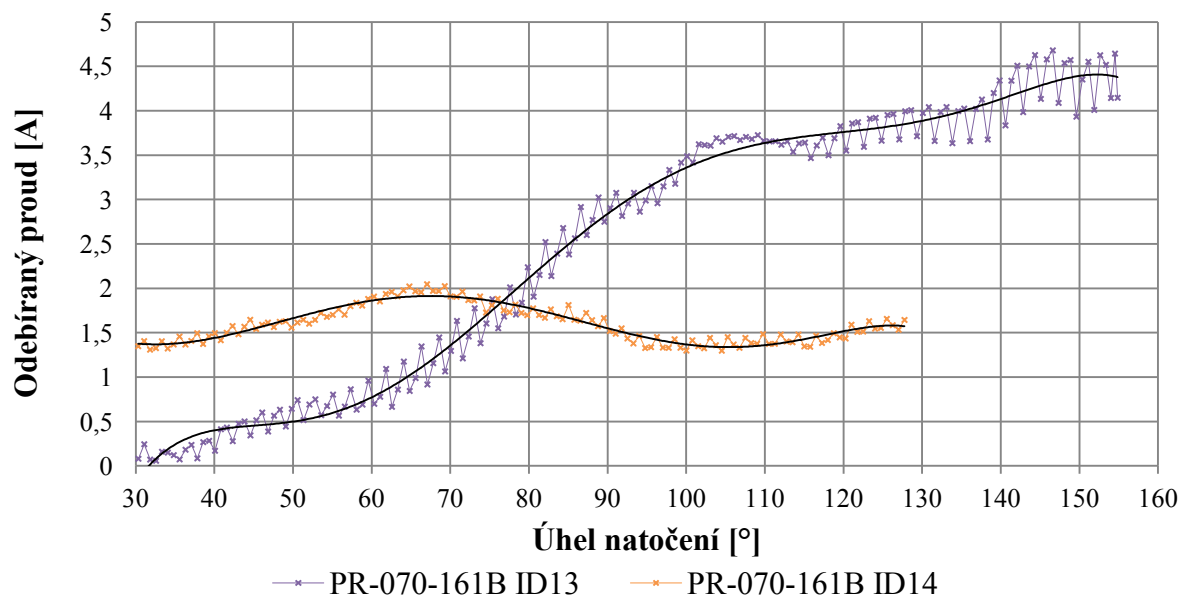
Tab. 5 Krouticí moment při referenčním cyklu stávajícího stavu manipulátoru.

4.1 Využití výkonu pohonných jednotek kinematického řetězce

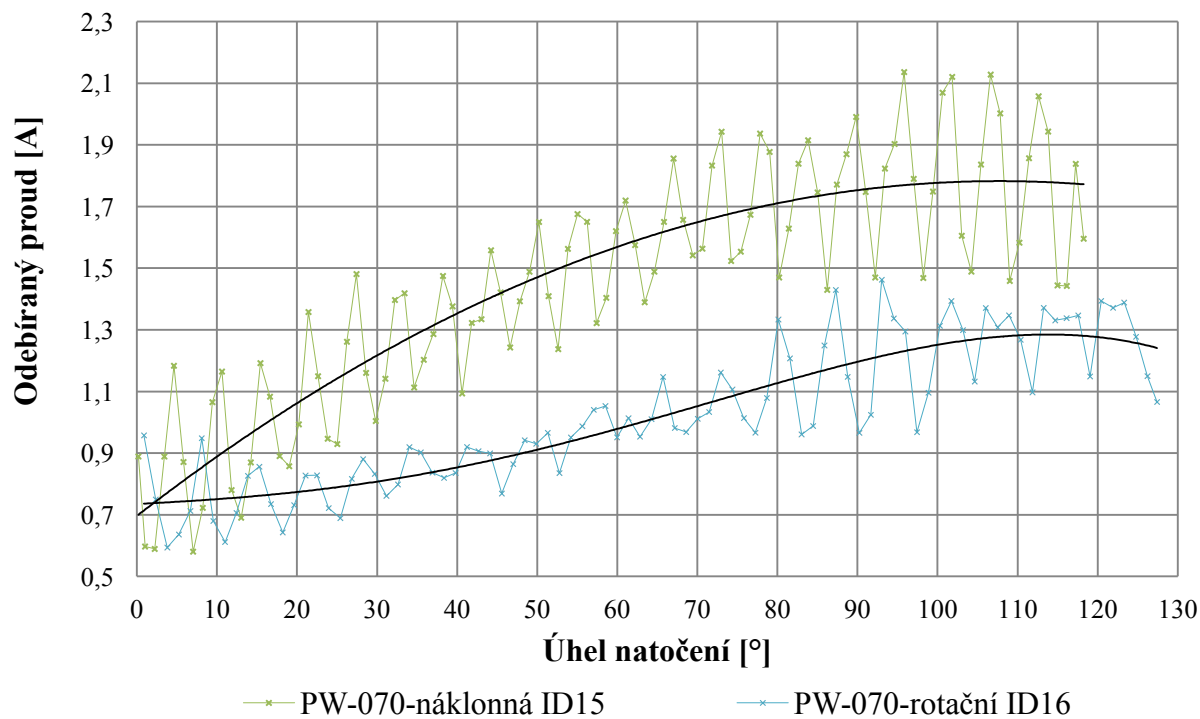
Pro návrh kinematického řetězce a jeho optimalizaci je nutné provést měření a vyhodnocení využití výkonu jednotlivých pohonných jednotek. Podstata spočívá v tom, že pohonné jednotky provedou pohyb v předpokládaném rozsahu nejvyššího zatížení úhlovou rychlostí $\omega = 10^\circ/s$ s úhlovým zrychlením $\varepsilon = 50^\circ/s^2$. Z průběhu odebíraného proudu je možné následně stanovit využití výkonu jednotlivých pohonných jednotek.



Graf 1 Proud odebíraný jednotkami PR – 090 - 161B (Obr. 7) během referenčního cyklu.

Pohybové jednotky PR-070-161B

Graf 2 Proud odebíraný jednotkami PR – 070 – 161B (Obr. 7) během referenčního cyklu.

Pohybová jednotka PW-070

Graf 3 Proud odebíraný jednotkou PW – 070 (Obr. 7) během referenčního cyklu.

Pohonná jednotka	Maximální odebíraný proud [A]	Maximální proud motoru [A]	Procentuální vyjádření [%]
PR-090-161B – ID11	2,9	20	14,5
PR-090-161B – ID12	8,4	20	42
PR-070-161B – ID13	4,7	7	67,1
PR-070-161B – ID14	2,1	7	30
PW-070 – ID15	2,2	6	27,5
PW-070 – ID16	1,5	4	37,5

Tab. 6 Odebíraný proud při referenčním cyklu - stávajícího stavu manipulátoru.

Z analýzy vyplývá, že nejvyšší využití výkonu má pohonná jednotka PR-070-161B - ID13 (Obr. 7, Tab. 6). Tuto pohonnou jednotku je tedy možné považovat za slabinu stávajícího uspořádání manipulátoru, protože při určitém nastavení délek spojovacích přírub by byla pohonná jednotka využita na maximum, zatímco ostatní pohonné jednotky by se maximálnímu využití nepřiblížily. Díky tomu je tedy možné provést návrh variant, které by tuto slabinu eliminovaly nebo alespoň zmírnily její dopad na celkovou nosnost a dosah manipulátoru.

Při měřeních a simulacích bylo zjištěno, že nároky na krouticí moment pohonné jednotky PW-070 jsou velice nízké. Maximální požadovaný krouticí moment této pohonné jednotky nedosahuje ani 50% jmenovitého krouticího momentu (Tab. 8, 9, 10). Z tohoto důvodu není nutné provádět vyhodnocení momentové konstanty pro tuto pohonnou jednotku.

5 DYNAMICKÝ MODEL POHONNÉ JEDNOTKY PR – 090 – 51B

5.1 Návrh experimentální metody stanovení momentové konstanty pohonné jednotky PR – 090 – 51B

Cílem experimentu je ověření možnosti získat hodnotu momentové konstanty k [Nm/A]. Experiment je proveden na nevyužívané pohonné jednotce PR-090-51B. Díky tomuto je možné předejít složité demontáži sestaveného manipulátoru. Po optimalizaci metodiky experimentu by bylo možné provést obdobný experiment také na sestaveném manipulátoru a získat tak momentové konstanty pro pohonné jednotky PR-090-161B, PR-070-161B a PW-070.

Následně by bylo možné provést optimalizaci 3D modelu, pro kterou by byl jako jedna z okrajových podmínek volen maximální krouticí moment jednotlivých pohonných jednotek vypočítaný na základě znalosti maximálního napájecího proudu a momentové konstanty. Díky tomu by bylo možné provést simulace na 3D modelu manipulátoru ještě před výrobou spojovacích prvků pohonných jednotek a zabránit tak nefunkčnosti či případné nutnosti snižovat nosnost manipulátoru v důsledku nedostatečného výkonu pohonných jednotek.

Popis experimentálního zařízení

Rozteče děr pro fixaci závaží experimentálního zařízení byly navrženy dle vzorce (1) tak, aby bylo možné postupně nastavit zátěžné krouticí momenty s maximálními hodnotami $M_{KT-MAX-1} = 11,7 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{KT-MAX-2} = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{KT-MAX-3} = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$ až $M_{KT-MAX-8} = 45 \text{ N} \cdot \text{m}$ s krokem $M_{KTR} = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$. Nastavení roztečí a hodnota krouticího momentu, který je způsobován experimentálním zařízením bez závaží $M_{KT-TRU} = 6,878 \text{ N} \cdot \text{m}$, byly odečteny z dynamické analýzy provedené v programu Creo 2. Příloha „Dynamická analýza – pohonná jednotka PR-090-51B“.

$$M_{KT-ZAV} = F \cdot r \quad (1)$$

$$M_{KT-MAX-i} = M_{KT-ZAV} + M_{KT-TRU} \quad (2)$$

Po dosazení (1) do (2):

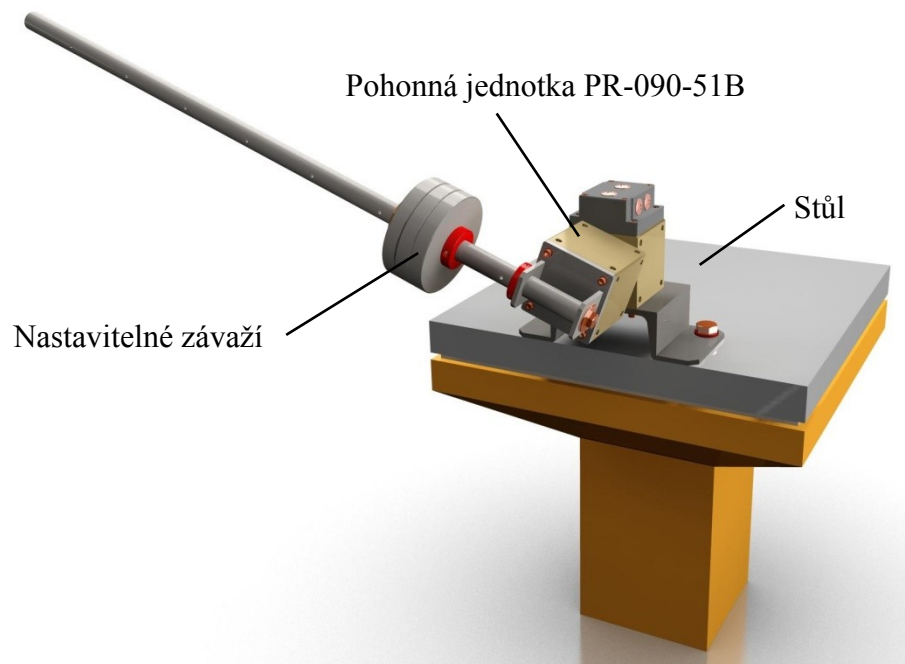
$$M_{KT-MAX-i} = F \cdot r + M_{KT-TRU}$$

$$r = \frac{M_{KT-MAX-i} - M_{KT-TRU}}{F}$$

Pro $M_{KT-MAX-1} = 11,7 \text{ N} \cdot \text{m}$:

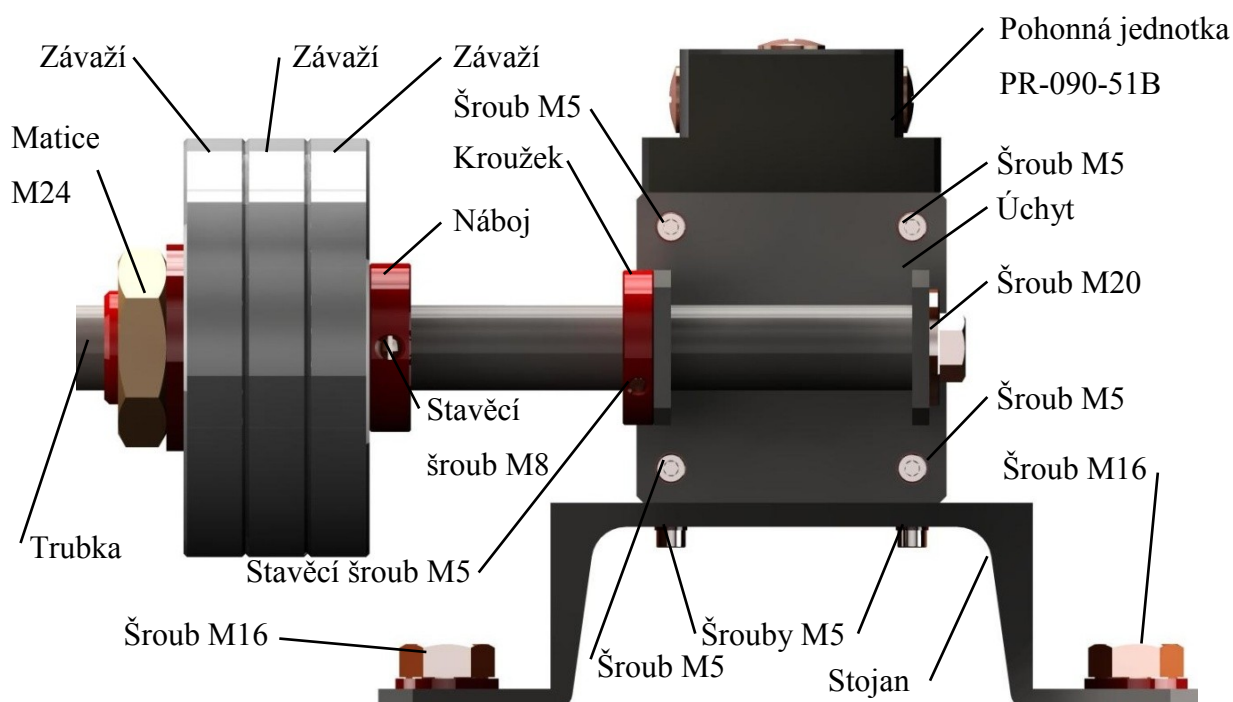
$$r = \frac{11,7 - 6,878}{48,76}$$

$$r = 0,0988 \text{ m} = 98,9 \text{ mm}$$



Obr. 11 Zkušební zařízení.

Pohonná jednotka PR-090-51B je pomocí čtyř šroubů M5 spojena se stojanem. Stojan je dvěma šrouby M16 upevněn ke stolu. K pohonné jednotce je čtyřmi šrouby M5 upevněn úchyt. Do úchyty je nasunuta trubka, která je zajištěna šroubem M20 a kroužkem. Tento kroužek je proti osovému posunutí pojištěn třemi stavěcími šrouby M5 s plochým koncem, pravidelně rozmístěnými po obvodu. Na trubce je nasunut náboj, na kterém jsou nasunuta tři závaží. Proti osovému posunutí jsou závaží pojištěna nízkou maticí M24. Náboj je fixován v požadované poloze stavěcím šroubem M8 s hrotem.

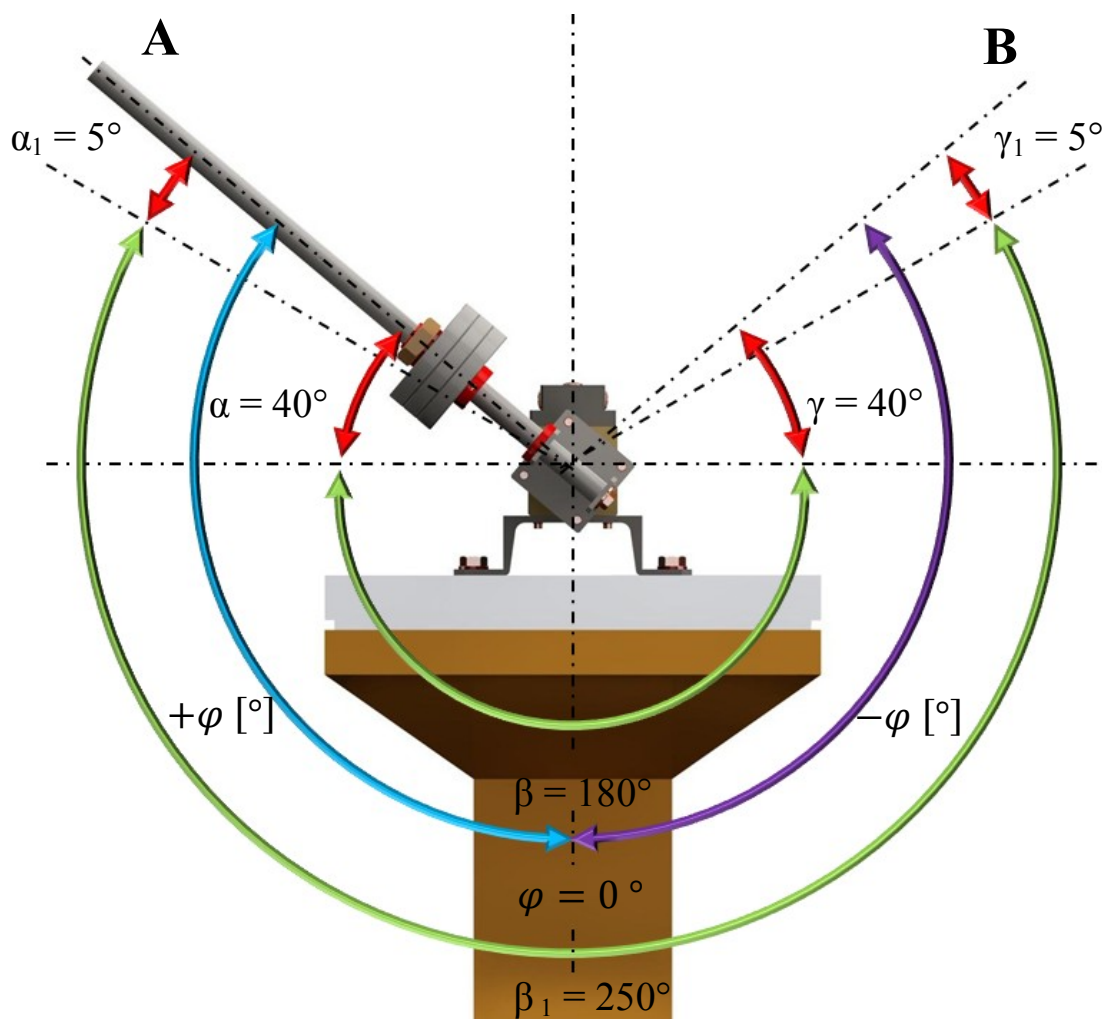


Obr. 12 Zkušební zařízení.

Pohonná jednotka je připojena k napájecímu zdroji. Signální kabeláž pohonné jednotky je spojena s PC. Řízení pohonné jednotky zajišťuje aplikace vytvořená Ing. Radimem Břenkem a modifikovaná Ing. Tomášem Kotem, Ph.D.

Aplikace umožňuje:

- polohové řízení
- nastavení rychlosti
- nastavení zrychlení
- nastavení časové změny zrychlení
- nastavení maximálního proudu
- měření a zaznamenávání polohy v čase
- měření a zaznamenávání proudu odebíraného pohonnou jednotkou v čase

Popis průběhu experimentu*Obr. 13 Popis experimentu.*

1. Pohonná jednotka PR-090-51B je nastavena do výchozí polohy A (Obr. 3). Úhel $\alpha = 40^\circ$ je volený k dosažení požadované úhlové rychlosti $\omega = 10^\circ/\text{s}$ úhlovým zrychlením $\varepsilon = 100^\circ/\text{s}^2$. Úhel $\gamma = 40^\circ$ označuje dráhu určenou k zabrzdění pohonné jednotky. Úhel $\beta = 180^\circ$ představuje hlavní část měřeného úseku. Jak úhel α , tak úhel γ jsou voleny s dostatečnou rezervou, tímto nedojde k znehodnocení měřeného úseku β skokovými změnami proudu $I_1 [\text{A}]$, způsobenými zrychlením, respektive zpomalením $\varepsilon [^\circ/\text{s}^2]$ pohonné jednotky. Závaží je nastaveno tak, aby působilo krouticím momentem o maximální hodnotě $M_{\text{KT-MAX-1}} = 11,7 \text{ N} \cdot \text{m}$. Hodnoty úhlové rychlosti $\omega = 10^\circ/\text{s}$, úhlového zrychlení $\varepsilon = 50^\circ/\text{s}^2$ a celkového úhlu $\delta = \alpha + \beta + \gamma = 260^\circ$ jsou nastaveny v řídicí aplikaci.

Velikosti úhlů jsou voleny pouze orientačně. S nejvyšší pravděpodobností dojde ke skokovým změnám proudu I_1 [A] pouze na začátku úhlu α a na konci úhlu γ . Díky tomu by bylo možné hodnotu úhlu β zvýšit přičtením částí úhlů α a γ , což by vedlo k získání přesnějšího průběhu střední hodnoty odebíraného proudu I_{s-1} [A].

2. Následně je pomocí řídicí aplikace spuštěno měření a zaznamenávání úhlu natočení pohonné jednotky φ [°] a proudu I_1 [A] odebíraného pohonnou jednotkou v čase. Dalším krokem je spuštění pohonné jednotky. Jednotka vykoná pohyb do koncové polohy B (Obr. 3) o úhel $\delta = 260^\circ$.

3. Průběh odebíraného proudu je následně porovnán s teoretickým průběhem krouticího momentu M_{KT-1} [N · m], který je získán z analýzy provedené na odpovídajícím modelu v programu Creo 2. Z porovnání je získána momentová konstanta k [Nm/A], tedy závislost mezi krouticím momentem M_{KT-1} [N · m] a proudem I_1 [A] odebíraným pohonnou jednotkou.

Měření je provedeno pro průběhy krouticího momentu s maximálními hodnotami $M_{KT-MAX-1} = 11,7 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{KT-MAX-2} = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{KT-MAX-3} = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$ až $M_{KT-MAX-8} = 45 \text{ N} \cdot \text{m}$ s krokem $M_{KTR} = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$.

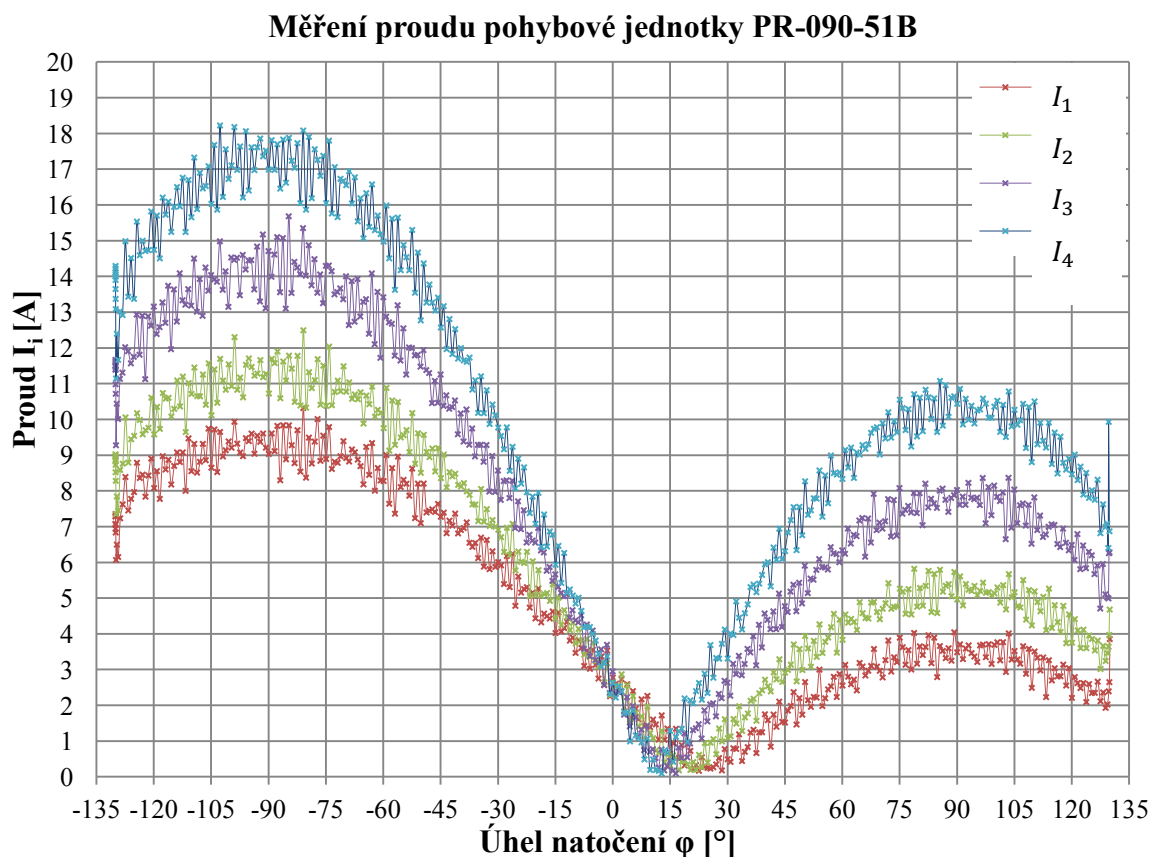
5.2 Vyhodnocení experimentální metody stanovení momentové konstanty pohonné jednotky PR – 090 – 51B

Pro správnou interpretaci výsledků měření byly změřené průběhy proudů I_i [A] v závislosti na úhlu natočení φ [°] pohonné jednotky vyneseny do grafu (Graf 1). Průběhy měřených proudů I_i [A] potvrzují původní předpoklad o znehodnocení měřených hodnot skokovými změnami proudu ve fázi zrychlování a zpomalování pohonné jednotky. Na základě tohoto zjištění bylo možné snížit hodnoty úhlů pro zrychlení a zpomalení na $\alpha_1 = 5^\circ$, $\gamma_1 = 5^\circ$. Hodnocený průběh proudu byl tedy rozšířen na úhel $\beta_1 = 250^\circ$ (Obr. 3). Z grafu (Graf 1) dále vyplývá, že pro nastavenou úhlovou rychlost pohybu $\omega = 10^\circ/\text{s}$ nedosahuje pohonná jednotka maximálního krouticího momentu $M_{K-MAX} = 45 \text{ N} \cdot \text{m}$ deklarovaného výrobce. Maximální krouticí moment, který byl při měření dosažen má hodnotu $M_{KT-MAX-4} = 25 \text{ N} \cdot \text{m}$. Takto výrazné snížení maximálního krouticího momentu

pohonné jednotky považují za důsledek nízké účinnosti DC motoru při nízké úhlové rychlosti $\omega = 10^\circ/\text{s}$.

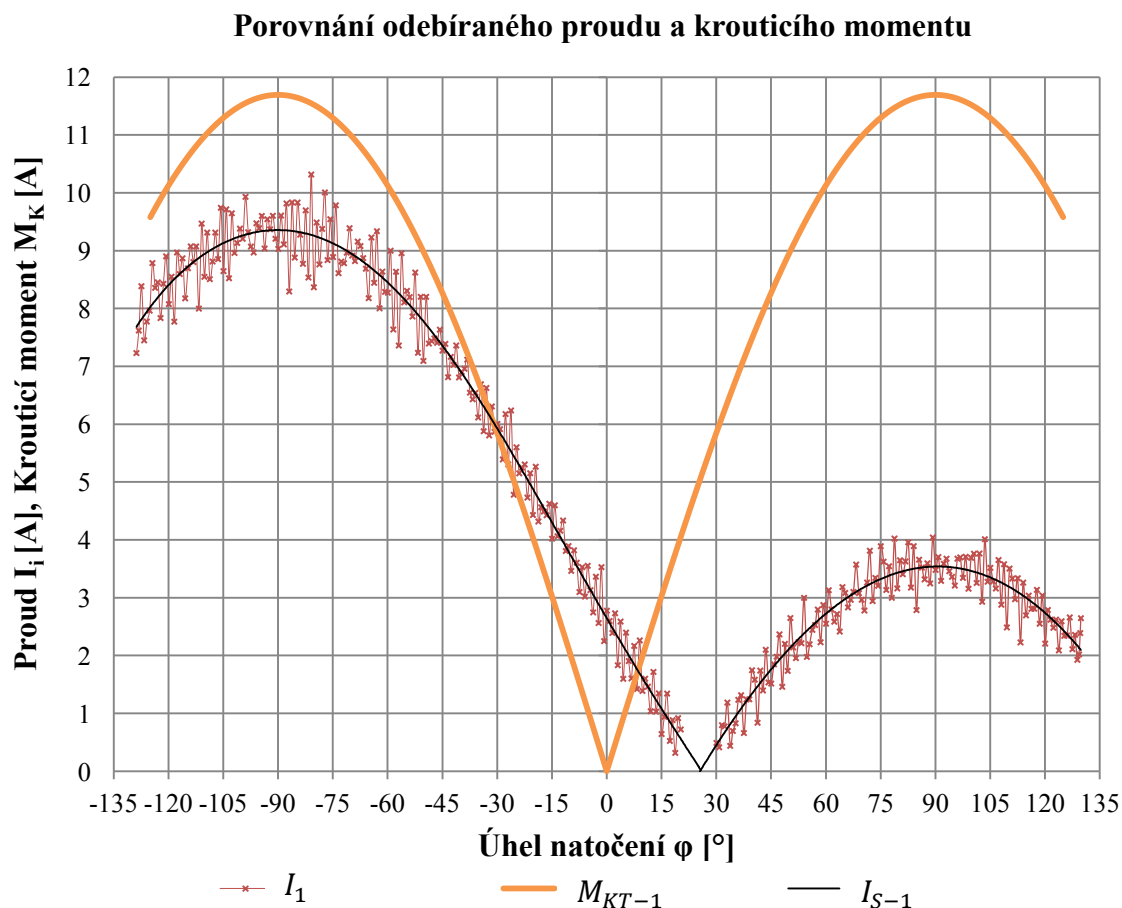
Střední hodnota odebíraného proudu I_{S-i} [A]:

Průběhy proudů byly v programu MS Excel proloženy polynomickými spojnicemi trendu. Touto metodou však nebyl vytvořen odpovídající průběh střední hodnoty odebíraného proudu I_{S-i} [A]. Naměřené průběhy tedy musely být dále upraveny. Úprava spočívá v rozdělení jednotlivých průběhů na dvě části a ve vynechání hodnot proudu $I_i < 0,5$ A. Tato hodnota je pouze orientační. Jednotlivé průběhy byly posuzovány samostatně. Takto vzniklé části byly samostatně proloženy polynomickou spojnici trendu odpovídajícího stupně tak, aby se protínaly v okolí $I_i = 0$ A (Graf 2.). Pomocí rovnic popisujících tyto spojnice je možné vypočítat střední hodnotu I_{S-i} [A] proudu I_i [A] při natočení o libovolný úhel φ [°].



Graf 4 Měření proudu pohonné jednotky PR-090-51B.

Pro objasnění vyhodnocovací metodiky bylo zvoleno první měření s maximálním krouticím momentem $M_{KT-MAX-1} = 11,7 \text{ Nm}$. Průběh teoretického krouticího momentu $M_{KT-1} [\text{Nm}]$ a tomu odpovídající průběh proudu $I_1 [\text{A}]$, respektive $I_{S-1} [\text{A}]$, je zobrazen v grafu Graf 2.



Graf 5 Porovnání odebíraného proudu a teoretického krouticího momentu.

Postup vyhodnocení:

1. Výpočet momentové konstanty:

Dílčí momentová konstanta $k_j [\text{Nm/A}]$ pro $\varphi_j = \varphi_1 \dots \varphi_m$ je vypočítána podle vzorce:

$$k_j = \frac{M_{KT-1-j}}{I_{S-1-j}} \quad (1)$$

Celková momentová konstanta k [Nm/A] je vypočtena jako aritmetický průměr dílčích momentových konstant:

$$k = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{M_{KT-1-j}}{I_{S-1-j}} \right)}{m} \quad (2)$$

Číslo měření	Úhel natočení	Teoretický krouticí moment	Střední hodnota odebíraného proudu	Dílčí momentová konstanta
j	φ [°]	M_{KT-1-j} [Nm]	I_{S-1-j} [A]	k_j [Nm/A]
1	-125	9,578	8,024	1,194
2	-124,9	9,590	8,032	1,194
3	-124,8	9,602	8,041	1,194
4	-124,7	9,613	8,049	1,194
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2499	124,8	-9,602	2,450	3,920
2500	124,9	-9,590	2,444	3,924
2501	125	-9,578	2,437	3,925
Celková momentová konstanta				$k = 2,422$ Nm/A

Tab. 7 Výpočet momentové konstanty.

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 5 vyplývá, že dílčí momentová konstanta k_j [Nm/A] není konstantní. Toto kolísání je způsobeno tím, že teoretický krouticí moment M_{KT-1-j} [Nm] použitý pro výpočet nezahrnuje ztráty v kinematickém řetězci pohonné jednotky PR-090-51B. Tyto ztráty je však nutné při výpočtu brát v úvahu. Pro úpravu postupu byl zaveden ztrátový krouticí moment $M_{KZ} = \text{konst. [Nm]}$. Upravené výpočtové vztahy tedy mají tvar:

Dílčí momentová konstanta k_j [Nm/A] pro $j = 1 \dots m$:

$$k_j = \left| \frac{M_{KT-1-j} + M_{KZ}}{I_{S-1-j}} \right| \quad (3)$$

Celková momentová konstanta k [Nm/A] pro $j = 1 \dots m$:

$$k = \frac{\sum_{j=1}^m \left| \frac{M_{KT-1-j} + M_{KZ}}{I_{S-1-j}} \right|}{m} \quad (4)$$

2. Při stanovení velikosti ztrátového krouticího momentu M_{KZ} [Nm] je vycházeno z podmínky zachování konstantní hodnoty dílčí momentové konstanty k_j [Nm/A] na celém zkoumaném úseku a z předpokladu, že výsledný krouticí moment M_{KS-1-j} [Nm], kterým působí elektromotor pohonné jednotky je reálně vyšší než teoretický krouticí moment M_{KT-1-j} [Nm] redukovaný na hřídel motoru, kterým je pohonná jednotka zatěžována. Ztrátový krouticí moment M_{KZ} [Nm] je pro výpočet nastavován v rozmezí: $M_{KZ-g} = M_{KZ-1} \dots M_{KZ-l}$ [Nm] s velikostí přírůstku M_{KZ-p} [Nm].

Pro výpočet momentové konstanty je tedy zaveden skutečný krouticí moment pro $j = 1 \dots m$, $g = 1 \dots l$:

$$M_{KS-1-j} = M_{KT-1-j} + M_{KZ-g} \quad (5)$$

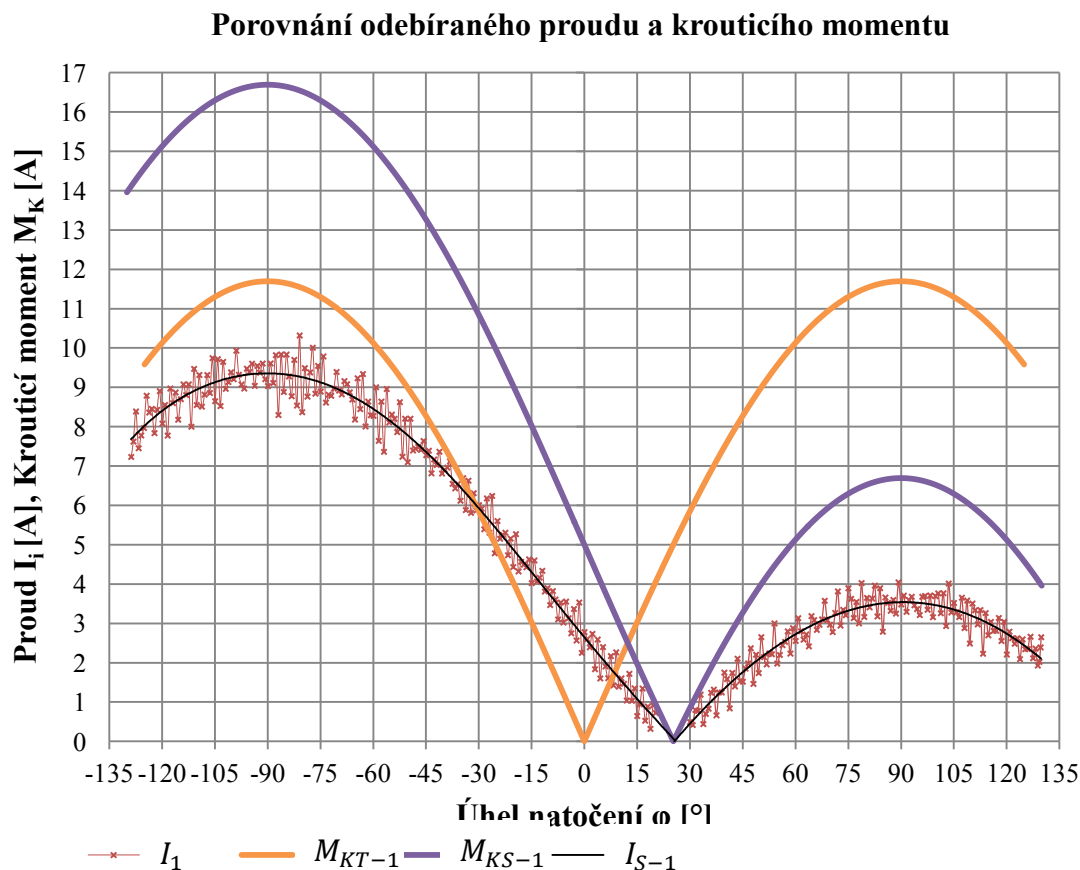
Postupnými změnami hodnoty ztrátového krouticího momentu M_{KZ-g} [Nm] dle zvoleného rozsahu dochází ke změnám hodnot skutečného krouticího momentu M_{KS-1-j} [Nm]. Hledaná hodnota ztrátového krouticího momentu M_{KZ-g} [Nm] je nalezena, jakmile minimální hodnoty skutečného krouticího momentu $M_{KS-1-MIN}$ [Nm] a střední hodnoty odebíraného proudu $I_{S-1-MIN}$ [A] odpovídají stejnému úhlu natočení φ [°]. Minimální střední hodnotě odebíraného proudu I_{S-1-j} [A] odpovídá tedy minimální hodnota skutečného krouticího momentu M_{KS-1-j} [Nm].

Číslo měření	Úhel natočení	Střední hodnota odebíraného proudu	Teoretický krouticí moment	Ztrátový krouticí moment	Skutečný krouticí moment	Dílčí momentová konstanta
j	φ [°]	I_{S-1-j} [A]	M_{KT-1-j} [Nm]	M_{KZ-g} [Nm]	M_{KS-1-j} [Nm]	k_j [Nm/A]
1	-125	8,024	9,578	5,090	14,668	1,8280
2	-124,9	8,033	9,590	5,090	14,680	1,8276
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1508	25,7	0,028	-5,070	5,090	0,019	----
1509	25,8	0,026	-5,089	5,090	0,0008	----
1510	25,9	0,036	-5,108	5,090	-0,018	----
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2500	124,9	2,444	-9,590	5,090	-4,500	1,8414
2501	125	2,437	- 9,578	5,090	-4,448	1,8415
Celková momentová konstanta				k = 1,837 Nm/A		

Tab. 8 Výsledný postup zjištění momentové konstanty.

Na základě znalosti průběhu skutečného krouticího momentu M_{KS-1-j} [Nm], respektive ztrátového krouticího momentu M_{KZ-g} [Nm], je možné vypočítat dílčí momentovou konstantu k_j [Nm/A] dle vzorce (3). K zajištění dostatečné přesnosti není dílčí momentová konstanta počítána pro střední hodnoty odebíraného proudu přibližně $I_{S-1-j} < 0,5$ A. Celková momentová konstanta je pak vypočítána dle vzorce (4).

Měřená data a vyhodnocení všech průběhů jsou uvedena v příloze „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-090-51B“. Na základě znalosti momentové konstanty k [Nm/A] je nyní možné vypočítat maximální skutečný krouticí moment M_{KS-1-j} [Nm] generovaný pohonnou jednotkou při maximální hodnotě střední hodnoty odebíraného proudu I_{S-1MAX} [A]. Pro optimalizaci délky spojovacích přírub manipulátoru je výsledný ztrátový krouticí moment M_{KZ-g} [Nm] přiřazen modelu pohonné jednotky jako třecí moment M_{KT} [Nm]. Díky tomu je možné nastavit okrajovou podmínku optimalizace tak, že maximální krouticí moment pohonné jednotky $M_{K-MAX-PJ}$ [Nm] je roven maximálnímu skutečnému krouticímu momentu M_{KS-MAX} [Nm].



Graf 6 Porovnání odebíraného proudu, teoretického a skutečného krouticího momentu.

Měření odebíraného proudu I_i [A] a vyhodnocení momentové konstanty k [Nm/A] pohonných jednotek PR-090-161B, PR-070-161B, tedy jednotek, ze kterých je sestaven manipulátor, je tedy možné provést bez demontáže. Maximální hodnoty proudů motorů pohonných jednotek jsou určeny pouze pro zrychlení, respektive zpomalení. Při pohybu s těmito hodnotami proudů po delší dobu může dojít k přetížení pohonné jednotky. Proto jsou hodnoty maximálních proudů pohonných jednotek pro výpočet maximálního skutečného krouticího momentu sníženy tak, aby za žádných okolností nedošlo k přetížení a následnému zastavení pohonné jednotky I^2T ochranou.

Výsledky vyhodnocení měření pohonných jednotek PR-090-161B a PR-070-161B jsou uvedeny v tabulce Tab. 7. Měřená data a kompletní vyhodnocení všech průběhů jsou uvedena v přílohách „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-090-161B“ a „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-070-161B“.

Pohonná jednotka	Maximální proud motoru [A]	Celková momentová konstanta [N·m/A]	Maximální skutečný krouticí moment [N·m]
PR-090-51B	20	1,84	36,8
PR-090-161B	20	5,29	105,8
PR-070-161B	7	6,38	40,4

Tab. 9 Vyhodnocení měření.

5.3 Tvorba simulačních modelů modulárních jednotek

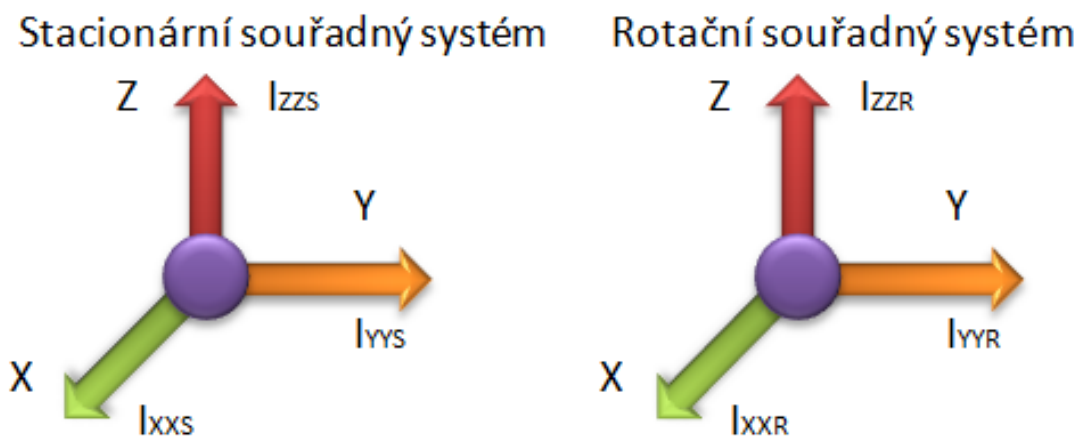
V dostupných 3D modelech modulárních jednotek od firmy Schunk nejsou nadefinovány parametry potřebné k sestavení odpovídajícího modelu manipulátoru, tedy hmotnost, poloha těžiště, momenty setrvačnosti pohonné jednotky okolo hlavních os a moment setrvačnosti kinematického řetězce pohonné jednotky. Tyto hodnoty bylo nutné získat od zástupců firmy Schunk. Zároveň není možné bez demontáže pohonné jednotky zjistit rozložení hmoty uvnitř pohonných jednotek. Proto bylo nutné tyto 3D modely upravit. Příprava 3D modelů pro simulace spočívá v tom, že veškeré parametry kromě rozměrů jsou určeny dvěma hmotnými souřadnými systémy „*Stacionárním souřadným systémem*“ a „*Rotačním souřadným systémem*“. Z tohoto je jasné, že katalogové hodnoty parametrů skutečných pohonných jednotek je nutné vhodným způsobem rozdělit mezi tyto souřadné systémy. Také je nutné uvážit vlastnosti programu Creo 2:

- Není možné zadat nulové hodnoty hustoty, objemu, hmotnosti a momentů setrvačnosti okolo hlavních os.
- Hmotnost dílu v režimu modelování je určena ze zadané hodnoty „*Hmotnost*“ (Obr. 20).
- Hmotnost dílu v režimu „*Mechanismy*“ je vypočítána ze zadaných hodnot „*Hustota*“ a „*Objem*“ (Obr. 20).

Postup tvorby je obdobný pro všechny jednotky a sestává z následujících kroků:

1. Nejprve je nutné zvolit rotační osy obou souřadných systémů. Skrze tyto osy budou souřadné systémy propojeny vazbou Pin. Ve všech pohonných jednotkách je jako rotační osa volena osa Z.

2. Následně jsou vhodným způsobem rozděleny parametry jednotky pro definici dvou souřadných systémů. Moment setrvačnosti kinematického řetězce jednotky, tedy moment setrvačnosti řetězce enkodér, brzda, motor, převodovka, rotační část pohonné jednotky, je nadefinován jako moment setrvačnosti rotačního souřadného systému okolo osy Z (Tab. 1).



Obr. 14 Stacionární a rotační souřadný systém.

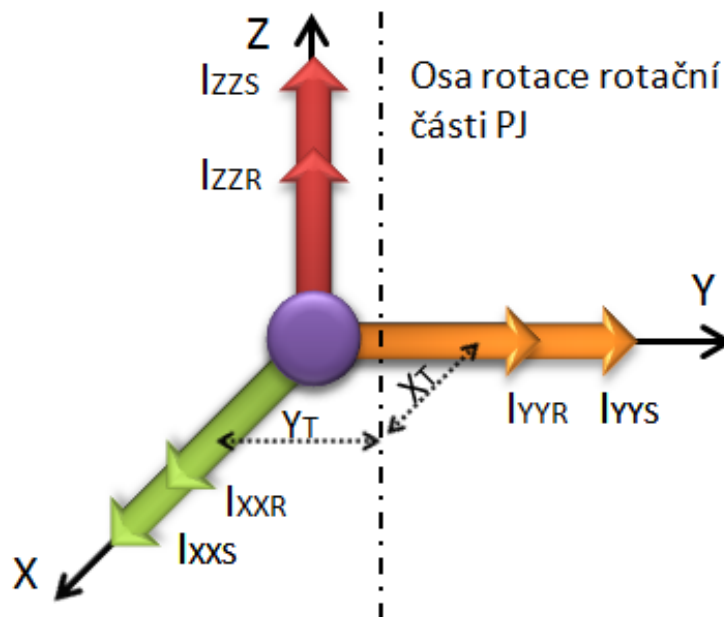
3. Dále je nutné takto stanovené parametry přiřadit dříve zmíněným souřadným systémům (Obr. 20).

4. Dalším krokem je vytvoření sestavy. Průnik tří automaticky vytvořených rovin označuje těžiště pohonné jednotky PR-090-51B. V této sestavě je následně vytvořena osa rotace rotační části pohonné jednotky ve vzdálenosti od těžiště dle katalogových údajů.

5. Do těžiště pohonné jednotky v sestavě je umístěn stacionární souřadný systém tak, že osa Z souřadného systému a osa vytvořená v sestavě jsou rovnoběžné.

6. Ke stacionárnímu souřadnému systému je následně uchycen rotační souřadný systém vazbou Pin.

Sestava souřadných systémů



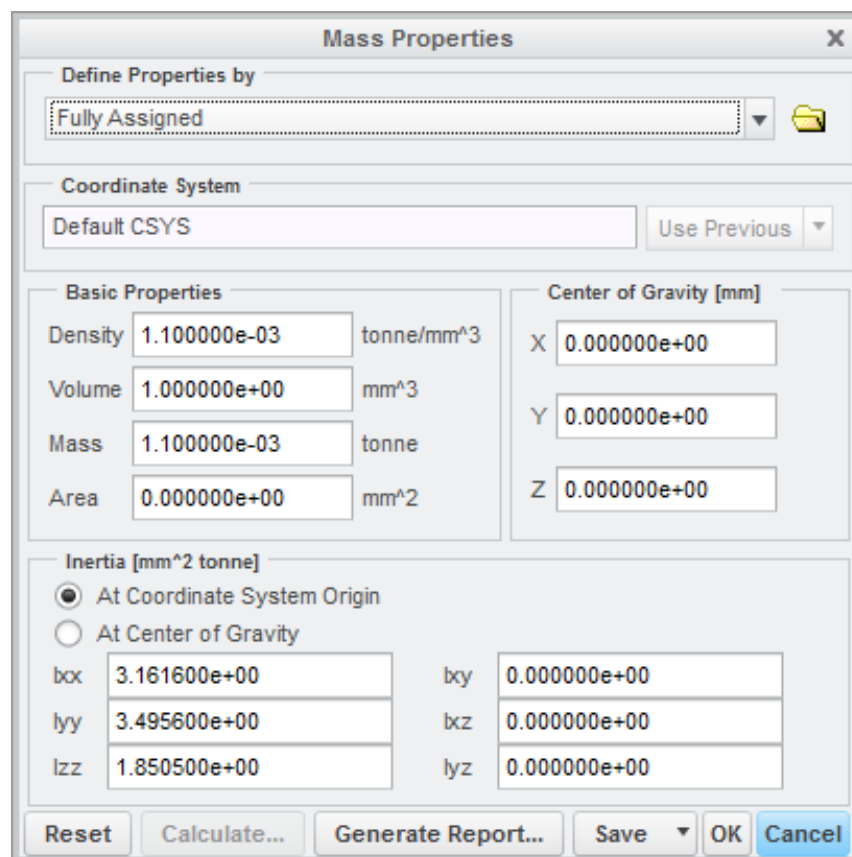
Obr. 15 Sestava souřadných systémů.

7. Následně je vložen plošný model stacionární části jednotky, který je spojen se stacionárním souřadným systémem. Dále je vložen plošný model rotační části pohonné jednotky, který je vazbou Pin spojen s osou vytvořenou v sestavě.

8. Posledním bodem postupu je propojení rotačního souřadného systému a rotační části pohonné jednotky vazbou „Gear“. Vazba simuluje převod ozubenými koly a její požadovaný převod je 1:1.

	Hustota $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Objem $[\text{m}^3]$	Hmotnost $[\text{kg}]$	Moment setrvačnosti $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		
				Ixx	Iyy	Izz
Stacionární souřadný systém	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	2,8	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$
Rotační souřadný systém	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	1	0,001	0,001	$6,53 \cdot 10^{-5}$
Katalogové hodnoty pohonné jednotky	-	-	3,8	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-2}$

Tab. 10 Definice parametrů pohonné jednotky PR-090-51B.



Mass Properties

Define Properties by
Fully Assigned

Coordinate System
Default CSYS Use Previous

Basic Properties

Density	1.100000e-03	tonne/mm ³
Volume	1.000000e+00	mm ³
Mass	1.100000e-03	tonne
Area	0.000000e+00	mm ²

Center of Gravity [mm]

X	0.000000e+00
Y	0.000000e+00
Z	0.000000e+00

Inertia [mm² tonne]

☒ At Coordinate System Origin
☐ At Center of Gravity

Ixx	3.161600e+00	Ixy	0.000000e+00
Iyy	3.495600e+00	Ixz	0.000000e+00
Izz	1.850500e+00	Iyz	0.000000e+00

Reset Calculate... Generate Report... Save OK Cancel

Obr. 16 Nastavení parametrů stacionární části pohonné jednotky.

Parametry pohonných jednotek PR-090-161B, PR-070-161B, PW-070 a PG-070 včetně jejich rozdělení jsou uvedeny v příloze „Parametry pohonných jednotek“.

6 VARIANTY ŘEŠENÍ

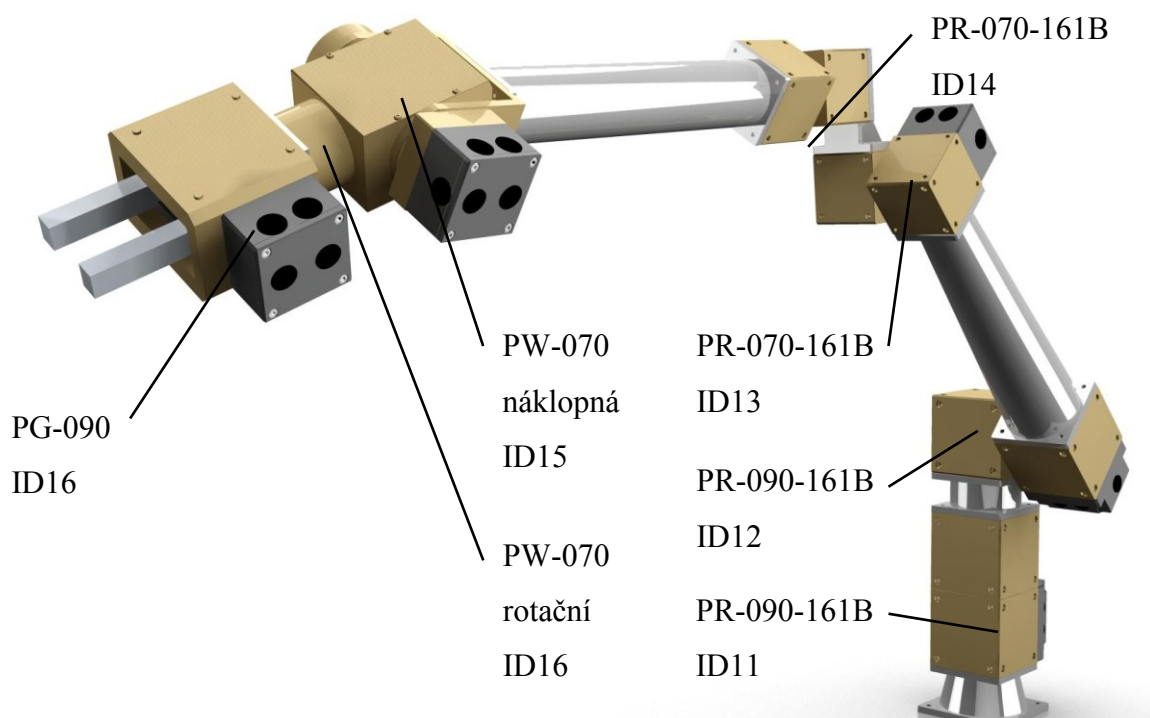
Varianty řešení spočívají ve změně kinematického řetězce manipulátoru a prodloužení spojovacích přírub. Prodloužení spojovacích přírub je provedeno v programu Creo 2 pomocí dynamické analýzy a optimalizace. Aby bylo možné varianty řešení porovnat, byl vytvořen referenční cyklus. Z os rotace pohonných jednotek byly odečteny průběhy zrychlení. Tyto průběhy zrychlení byly následně nadefinovány do pohonů pohonných jednotek ve všech variantách řešení. Maximální krouticí momenty PR-090-161B, PR-090-51B a PR-070-161B jsou voleny dle tabulky (Tab. 7). Jako maximální krouticí momenty pohonné jednotky PW-070 jsou voleny jmenovité hodnoty. [10]

6.1 Požadavkový list

- Vytvořte 3D modely modulárních pohonných jednotek PR-070, PR-090, PW-070, PG-070 v programu Creo 2 tak, aby jim bylo možné přiřadit hmotnosti, momenty setrvačnosti okolo hlavních os souřadného systému, momenty setrvačnosti rotačních částí modulárních pohonných jednotek a polohu těžiště dle katalogových hodnot.
- Z vytvořených 3D modelů sestavte a optimalizujte sériovou strukturu manipulátoru vhodnou k aplikaci na mobilní podvozek servisního robotu. Dosah, zrychlení a maximální rychlost manipulátoru přizpůsobte minimální nosnosti 1 kg.
- Specifikujte požadavky robotického ramene na mobilní podvozek:
 - energetické požadavky
 - požadavky na přenos dat
 - minimální rozměry a hmotnost robotu, které zajistí dostatečnou stabilitu.

6.2 Varianta A

Varianta A představuje stávající provedení manipulátoru. Z porovnání obrázků Obr. 7 a 8 je patrné, že snížením nosnosti bylo docíleno značného zvýšení dosahu. Maximální dosah manipulátoru v původní konfiguraci činí 645 mm. Maximální dosah této varianty činí 1212 mm.



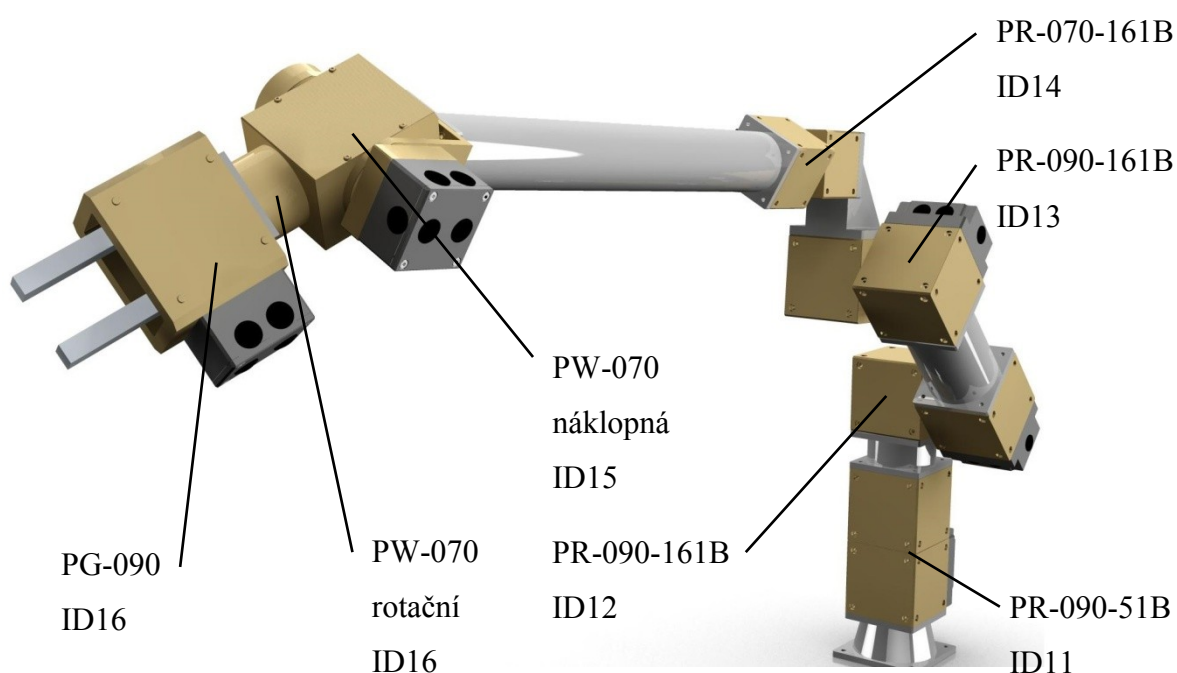
Obr. 17 Varianta A.

Pohonná jednotka	Maximální krouticí moment při simulaci [N·m]	Maximální krouticí moment [N·m]	Procentuální vyjádření [%]
PR-090-161B – ID11	4,9	105,8	4,6
PR-090-161B – ID12	72	105,8	68
PR-070-161B – ID13	23	40,4	56,9
PR-070-161B – ID14	2,2	40,4	5,4
PW-070 – ID15	4,8	12	40
PW-070 – ID16	0,2	2	10
Celkové využití manipulátoru			30,8

Tab. 11 Krouticí momenty při referenčním cyklu – varianta A.

6.3 Varianta B

Varianta B spočívá v nahrazení pohonné jednotky PR-090-161B ID11 (Obr. 8) nevyžívanou pohonnou jednotkou PR-090-51B ID11 (Obr. 9). Pohonnou jednotku PR-070-161B ID13 (Obr. 8) bylo následně možné nahradit pohonnou jednotkou PR-090-161B ID11 (Obr. 8). Maximální dosah této varianty činí 1210 mm. Nižší dosah než u varianty A je důsledkem vyšší hmotnosti pohonné jednotky PR-090-161B ID13 (Obr. 9). Omezujícím kritériem zabráňujícím dalšímu zvýšení dosahu je dosažení maximálního reakčního momentu v ložiskách pohonné jednotky PR-090-51B ID11 (Obr. 9).



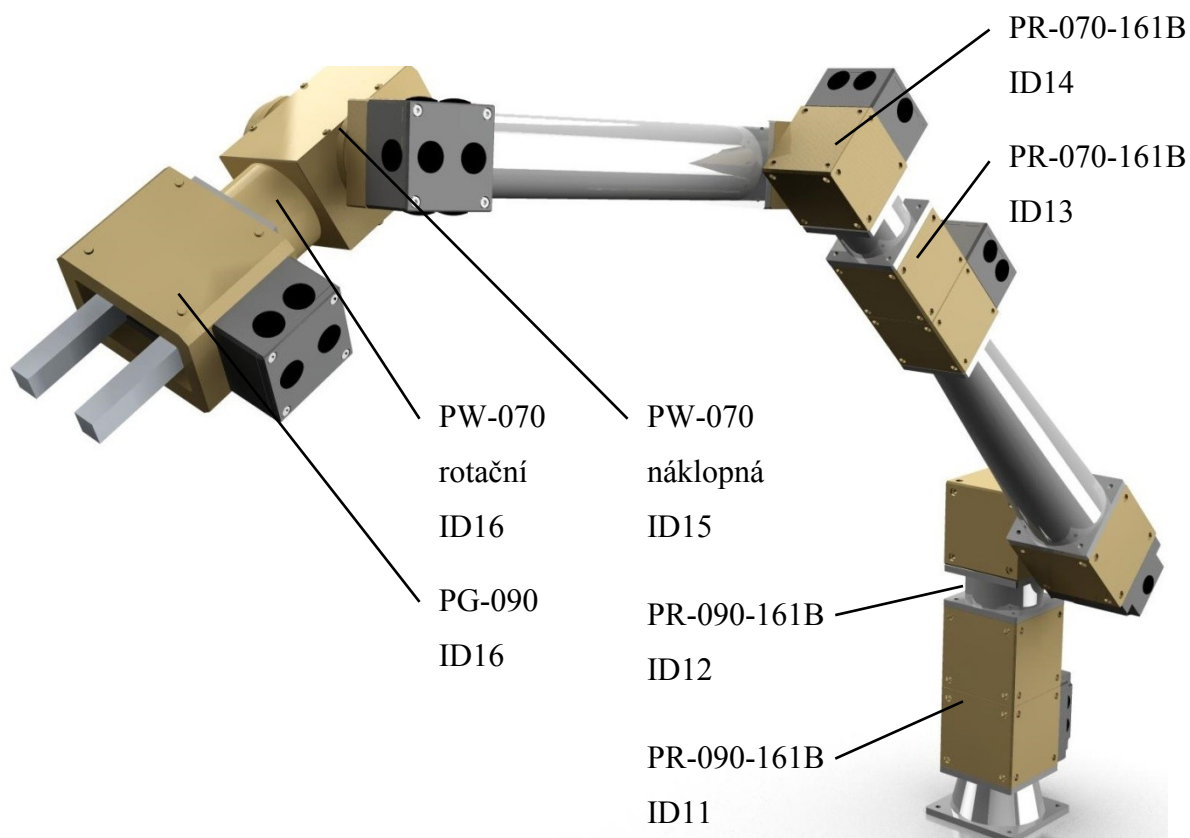
Obr. 18 Varianta A.

Pohonná jednotka	Maximální krouticí moment při simulaci [N·m]	Jmenovitý krouticí moment pohonné jednotky [N·m]	Procentuální vyjádření [%]
PR-090-51B – ID11	4,1	36,8	11,1
PR-090-161B – ID12	72	105,8	68
PR-090-161B – ID13	23	105,8	21,7
PR-070-161B – ID14	0,6	40,4	1,5
PW-070 – ID15	4,5	12	37,5
PW-070 – ID16	0,2	2	10
Celkové využití manipulátoru			25

Tab. 12 Krouticí momenty při referenčním cyklu – varianta B.

6.4 Varianta C

Varianta B spočívá ve změně polohy os rotace pohonných jednotek PR-070-161B. Touto úpravou byla snížena hmotnost části manipulátoru, která rotuje okolo horizontální osy čtvrtého kloubu. Tímto byl tedy snížen požadovaný krouticí moment na jednotku PR-070 (4).



Obr. 19 Varianta C.

Pohonná jednotka	Maximální krouticí moment při simulaci [N·m]	Maximální skutečný krouticí moment [N·m]	Procentuální vyjádření [%]
PR-090-161B – ID11	6,5	105,8	6,2
PR-090-161B – ID12	80	105,8	75,6
PR-070-161B – ID13	4,4	40,4	18,7
PR-070-161B – ID14	28	40,4	10,9
PW-070 – ID15	4,8	12	40
PW-070 – ID16	0,2	2	10
Celkové využití manipulátoru			26,9

Tab. 13 Krouticí momenty při referenčním cyklu – varianta C.

7 VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

Pro výběr optimální varianty uspořádání pohonných jednotek v kinematickém řetězci manipulátoru je použita metoda porovnání v trojúhelníku párů.

Hodnoty kritérií:

Vysoká úroveň	6
Dobrá úroveň	5
Průměrná úroveň	4
Nízká úroveň	3
Nevyhovující úroveň	2
Nepříznivý stav	1

Tab. 14 Hodnoty kritérií.

Významnost kritérií:

Nejvyšší	2
Nejnižší	1

Tab. 15 Významnost kritérií.

Kritéria hodnocení:

Tabulka Tab. 8 obsahuje přehled kritérií volených pro hodnocení jednotlivých variant řešení.

Označení kritéria	Kriterium	Popis kriteria
K1	Dosah	Maximální dosah manipulátoru
K2	Hmotnost	Minimální hmotnost manipulátoru
K3	Úpravy	Náročnost úprav manipulátoru
K4	Účinnost	Využití výkonu pohonných jednotek
K5	Kinematická struktura	Účelnost kinematické struktury

Tab. 16 Kritéria hodnocení.

Porovnání kritérií:

Kriterium	Varianta A	Varianta B	Varianta C
K1	1212 mm	1210 mm	1210 mm
K2	18,1 kg	20,5 kg	17,8 kg
K3	Střední	Nízká	Střední
K4	30,8 %	25 %	26,9 %
K5	Vysoká	Vysoká	Nízká

Tab. 17 Hodnoty sledovaných kritérií jednotlivých variant řešení.

Hodnocení kritérií:

Kritérium	Varianta A	Varianta B	Varianta C
K1	6	6	6
K2	5	4	6
K3	4	5	4
K4	5	5	5
K5	5	5	3

*Tab. 18 Bodové hodnocení variant řešení.***Určení významnosti:**

Porovnávané páry kritérií				Počet voleb v	Pořadí
K1	K1	K1	K1	3,5	1
K2	K3	K4	K5		
	K2	K2	K2	1,5	2
	K3	K4	K5		
		K3	K3	0	4
		K4	K5		
			K4	1	3
			K5	3,5	1

*Tab. 19 Určení významnosti metodou porovnání v trojúhelníku párů.***Závislost váhy významnosti q na počtu voleb v:**

$$q = a \cdot v + b \quad (6)$$

Po dosazení nejnižšího počtu voleb $v = 0$ a nejnižší hodnoty významnosti $q = 1$ do vzorce (6):

$$q = a \cdot v + b$$

$$1 = a \cdot 0 + b$$

$$b = 1$$

Po dosazení nejvyššího počtu voleb $v = 3,5$ a nejvyšší hodnoty významnosti $q = 2$ do vzorce (6):

$$q = a \cdot v + b$$

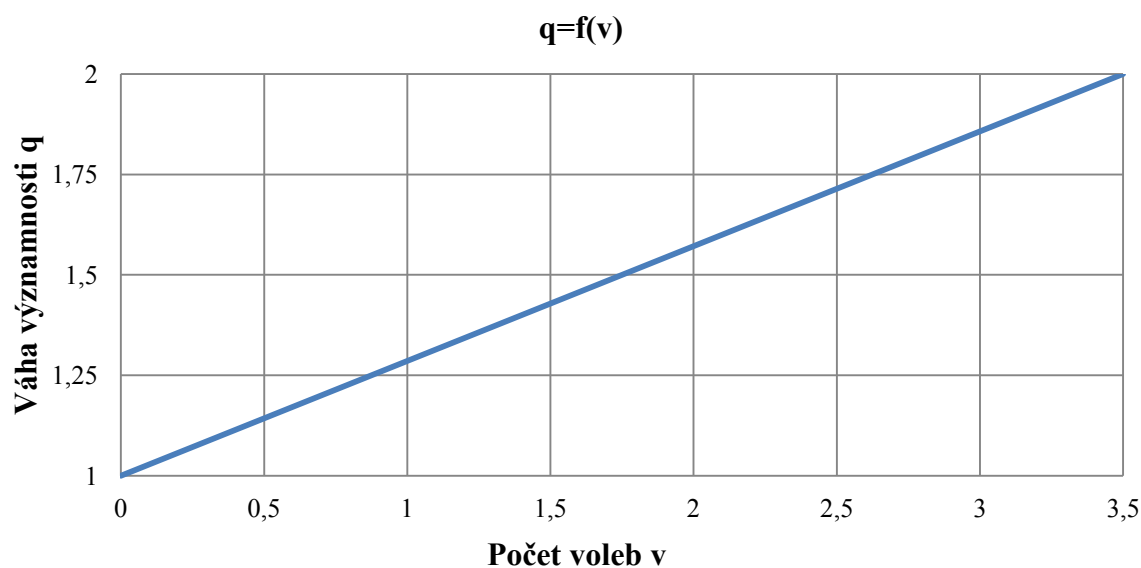
$$2 = a \cdot 3,5 + 1$$

$$a = \frac{1}{3,5} = \frac{2}{7}$$

Po dosazení hodnot $a = \frac{2}{7}$ a $b = 1$ do rovnice (6) je získána závislost váhy významnosti q na počtu voleb v :

$$q = a \cdot v + b$$

$$q = \frac{2}{7} \cdot v + 1$$



Graf 1 Závislost váhy významnosti na počtu voleb.

Váha významnosti jednotlivých kritérií:

Kritérium	Váha významnosti kritéria q
K1	2
K2	1,429

K3	1
K4	1,286
K5	2

*Tab. 20 Váha významnosti.***Varianta A vyhodnocení kritérií:**

Kritérium	Varianta A		
	Bodové hodnocení kritéria	Váha významnosti kritéria q	Vážený index kritérií lij*
K1	6	2	12
K2	5	1,429	7,145
K3	4	1	4
K4	5	1,286	6,43
K5	5	2	10
Celkový součet vážených indexů lij*varianty A			39,56

*Tab. 21 Výsledné hodnocení varianty A.***Varianta B vyhodnocení kritérií:**

Kritérium	Varianta B		
	Bodové hodnocení kritéria	Váha významnosti kritéria q	Vážený index kritérií lij*
K1	6	2	12
K2	4	1,429	5,72
K3	5	1	5
K4	5	1,286	6,43
K5	5	2	10
Celkový součet vážených indexů lij*varianty B			39,15

*Tab. 22 Výsledné hodnocení varianty B.***Varianta C vyhodnocení kritérií:**

Kritérium	Varianta C		
	Bodové hodnocení kritéria	Váha významnosti kritéria q	Vážený index kritérií lij*
K1	6	2	12

K2	6	1,429	8,57
K3	4	1	4
K4	5	1,286	6,43
K5	3	2	6
Celkový součet vážených indexů $lij \cdot \text{varianty C}$			37

*Tab. 23 Výsledné hodnocení varianty C.***Vyhodnocení:**

Pořadí	Celkový součet vážených indexů $lij \cdot$	Varianta
1	39,56	A
2	39,15	B
3	37	C

Tab. 24 Vyhodnocení.

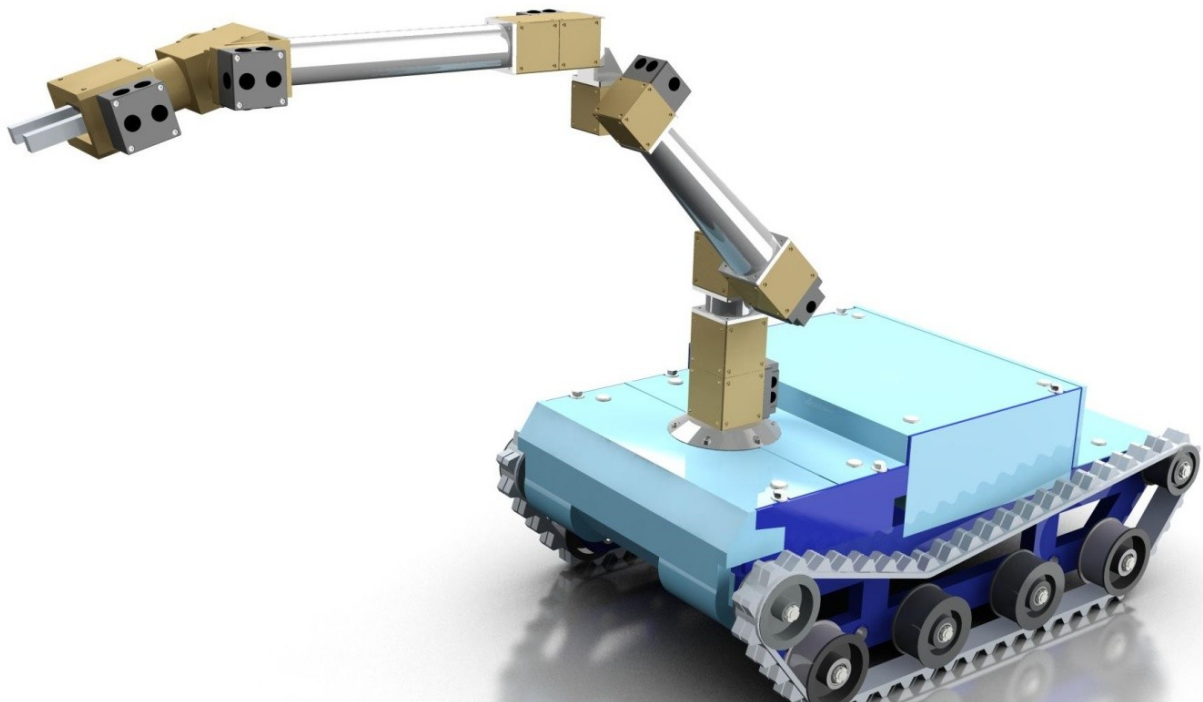
Na základě porovnání je patrné, že optimální variantou kinematické struktury je varianta A.

8 POPIS OPTIMÁLNÍ VARIANTY

Optimální varianta manipulátoru disponuje sférickou angulární kinematickou strukturou, tedy nejčastěji užívanou kinematickou strukturou zejména v průmyslové robotice. Šest stupňů volnosti manipulátoru zajišťuje dostatečnou pohyblivost.

Parametry pohybu koncového bodu manipulátoru:

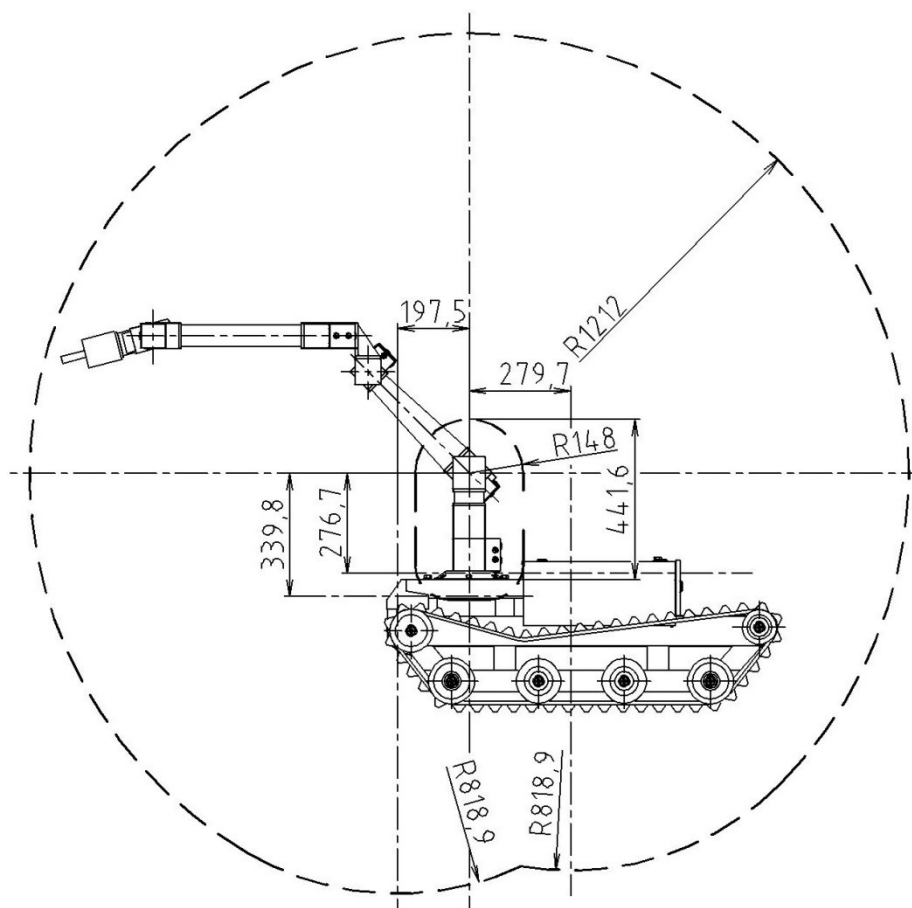
- maximální rychlost $v_k = 80 \text{ mm/s}$
- maximální zrychlení $a_k = 400 \text{ mm/s}^2$
- maximální dosah $L = 1212 \text{ mm}$



Obr. 20 Aplikace optimální varianty na servisní robot „Ares“.

Energetické požadavky:

- napájecí napětí $U = 24 \text{ V}$
- maximální odebíraný proud $I = 68 \text{ A}$



Obr. 21 Pracovní prostor.

Požadavky na přenos dat:

Manipulátor je schopen komunikovat pomocí rozhraní RS232, CAN, Profibus. Momentálně je komunikace manipulátoru s PC zajišťována skrze rozhraní CAN a USB/CAN převodník.

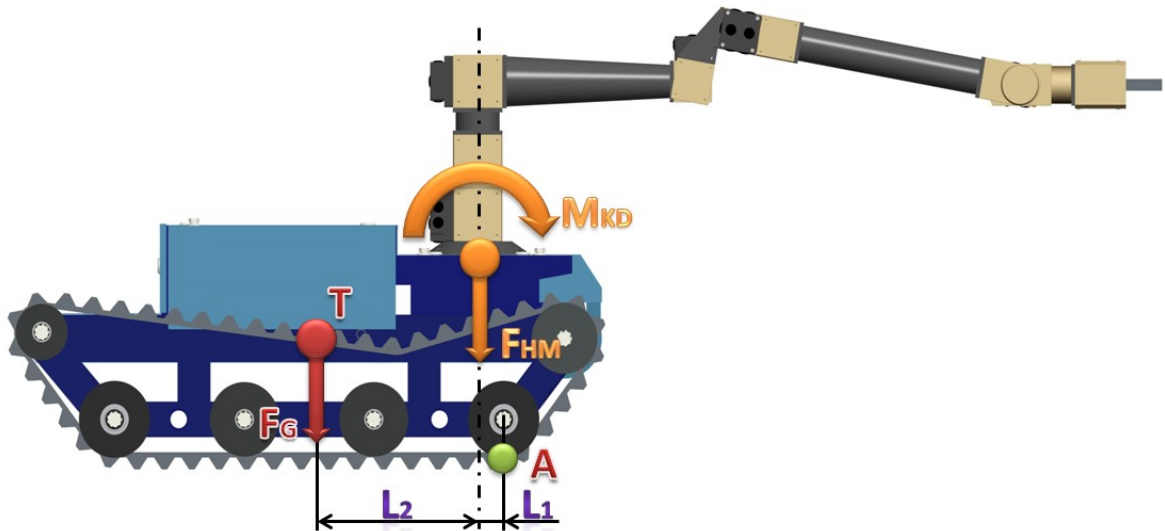
Minimální rozměry a hmotnost pro zajištění dostatečné stability:

Pro výpočet minimální hmotnosti je použit pásový podvozek robotu „Ares“.

Vstupní hodnoty:

- klopný moment – dynamický $M_{KD} = 80 \text{ N} \cdot \text{m}$
- síla způsobená hmotností manipulátoru $F_{HM} = 185 \text{ N}$
- síla způsobená hmotností robotu $F_G = 185 \text{ N}$

- vzdálenost od působíště síly F_{HM} k okraji
dotykové plochy robotu $L_1 = 0,047 \text{ m}$
- vzdálenost od působíště síly F_G k působíšti
síly F_{HM} $L_2 = 0,3 \text{ m}$
- gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



Obr. 22 Rovnováha sil.

$$\sum M_A = 0 \quad (7)$$

$$M_{KD} = F_G \cdot (L_1 + L_2) + F_{HM} \cdot L_1$$

$$F_G = \frac{M_{KD}}{L_1 + L_2} - \frac{F_{HM} \cdot L_1}{L_1 + L_2}$$

$$F_G = \frac{80}{0,047 + 0,3} - \frac{185 \cdot 0,047}{0,047 + 0,3}$$

$$F_G = 205,5 \text{ N}$$

$$m_R = \frac{F_G}{g} \quad (8)$$

$$m_R = \frac{205,5}{9,81}$$

$$m_R = 20,95 \text{ kg}$$

Z výpočtu vyplývá, že minimální hmotnost podvozku mobilního robotu je $m_R = 20,95 \text{ kg}$.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce byla vypracována na základě zadání a požadavkového listu. Pro objasnění tematiky práce byla provedena rešerše na téma využití manipulátorů mobilních robotů. V další části rešerše byl uveden přehled modulárních pohonných jednotek od různých výrobců pro vytvoření představy o výkonových parametrech.

Vzhledem k tomu, že hodnoty momentových konstant jednotlivých pohonných jednotek jsou firmou Schunk považovány za firemní tajemství, bylo nutné navrhnout experimentální metodu pro získání těchto konstant. V přípravné fázi byl navržen princip metody. Následně bylo nutné navrhnout a vyrobit zařízení pro nastavování zátěžných krouticích momentů. Po zprovoznění měřicího pracoviště byla provedena zkušební měření za účelem optimalizace navržené experimentální metody. Z výsledků měření byly následně získány momentové konstanty pohonných jednotek PR-090-161B, PR-090-51B, PR-070-161B.

Na základě analýzy manipulátoru a znalosti momentových konstant bylo možné vytvořit varianty řešení, které jsou pro použití v kombinaci s mobilním robotem vhodnější než manipulátor v aktuálním stavu. Podstatou všech variant bylo prodloužení dosahu manipulátoru s dodržáním minimální nosnosti 1 kg. Z těchto variant byla následně pomocí metody porovnání v trojúhelníku párů vybrána optimální varianta řešení. Spojovací prvky pohonných jednotek optimální varianty byly pevnostně analyzovány.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BŘENEK, Radim. *Víceosý systém s integrovanými pohony* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/94203>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Petr Novák.
- [2] IRobot 710 Warrior: Specifications. IROBOT. *IRobot Corporation: Robots that Make a Difference* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.irobot.com/us/robots/defense/warrior/Specifications.aspx>
- [3] Hardy: mobilní robot katedry. *Katedra robototechniky* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://robot.vsb.cz/mobilni-roboty/hardy/>
- [4] Venuše (planeta). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Venu%C5%A1e_\(planeta\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Venu%C5%A1e_(planeta))
- [5] NASA [online]. 2. 11. 2010 [cit. 2013-05-19]. Artist's Concept of Rover on Mars. Dostupné z: http://www.nasa.gov/mission_pages/mer/multimedia/gallery/pia04413.html
- [6] Unikátní robotické ruce se ovládají hlavou. In: *Novinky.cz* [online]. 2010 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: [view-source:http://www.novinky.cz/internet-a-pc/194895-unikatni-roboticke-ruce-se-ovladaji-hlavou.html](http://www.novinky.cz/internet-a-pc/194895-unikatni-roboticke-ruce-se-ovladaji-hlavou.html)
- [7] PR_070_DE. *SCHUNK GmbH & Co.: KG Spann- und Greiftechnik* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/PR_070_DE.pdf
- [8] PR_090_DE. *SCHUNK GmbH & Co.: KG Spann- und Greiftechnik* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/PR_090_DE.pdf
- [9] PR_110_DE. *SCHUNK GmbH & Co.: KG Spann- und Greiftechnik* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/PR_110_DE.pdf
- [10] PR_110_DE. *SCHUNK GmbH & Co.: KG Spann- und Greiftechnik* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/OM_AU_PW_DE.pdf
- [11] ERMB_CZ. *Festo: Pneumatic & Electric Automation Worldwide* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/ERMB_CZ.PDF

11 PŘÍLOHY

Příloha A

Výkresová dokumentace:

- Výrobní výkres „PRO473 – D01“
- Výrobní výkres „PRO473 – D02“
- Výrobní výkres „PRO473 – D03“
- Výrobní výkres „PRO473 – D04“
- Výrobní výkres „PRO473 – D05“
- Výrobní výkres „PRO473 – D06“
- Výrobní výkres „PRO473 – D07“
- Výrobní výkres „PRO473 – D08“
- Výrobní výkres „PRO473 – D09“
- Výrobní výkres „PRO473 – D10“
- Výrobní výkres „PRO473 – D11“
- Výrobní výkres „PRO473 – D12“
- Výkres podsestavy „PRO473 – PS1“
- Výkres svařence „PRO473 – SV1“
- Výkres svařence „PRO473 – SV2“
- Kusovník „PRO473 – K01“
- Sestavný výkres „PRO473 – S01“

Příloha B

DVD „Diplomová práce – PRO473“

Obsah:

- „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-090-161B“
- „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-070-161B“
- „Parametry pohonných jednotek“
- „Aplikace v obranné a vojenské technice“
- „Určení momentové konstanty pohonné jednotky PR-090-51B“
- „Dynamická analýza – pohonná jednotka PR-090-51B“
- „Dynamická analýza – Aktuální stav manipulátoru“
- „Dynamická analýza – Varianta A“
- „Dynamická analýza – Varianta B“
- „Dynamická analýza – Varianta C“